







Faculté de génie  
Département de génie civil

# ÉVALUATION NON-DESTRUCTIVE DE LA QUALITÉ DE L'ADHÉRENCE ENTRE DEUX BÉTONS PAR LA MÉTHODE DE LA RÉPONSE IMPULSIONNELLE

Thèse de doctorat  
Spécialités : génie civil et génie mécanique

MIHINDOU MBINA

Jury : Richard GAGNÉ (Directeur)  
Patrice MASSON (Codirecteur)  
Jamal Eddine RHAZI (Examineur)  
Nicolas QUAEGEBEUR (Examineur)  
Benoit BISSONNETTE (Examineur)  
Patrice RIVARD (Rapporteur)





*À mon père. En Afrique, on dit les morts ne sont jamais morts. Merci pour ton inspiration !*

*À ma mère. Merci pour ton amour inconditionnel, ta persévérance et tes sacrifices à mon égard !*

# RÉSUMÉ

L'accélération du vieillissement des infrastructures (ponts, autoroutes, barrages, chemins de fer, etc.) construites dans les années 1960 pousse aujourd'hui les autorités, notamment canadiennes, à prendre des mesures efficaces en vue de maintenir le plus longtemps possible l'intégrité et la durabilité des structures. Plusieurs projets sont ainsi envisagés et financés par les gouvernements afin de développer des méthodes d'auscultation à la pointe de la technologie et de l'innovation.

Ce projet de doctorat s'inscrit ainsi dans le cadre du programme conjoint CRSNG-FRQNT de bourses de recherche en milieu pratique « BMP Innovation ». Le programme « BMP Innovation » a pour objectif de favoriser l'accroissement des compétences en innovation des entreprises et l'employabilité des futurs diplômés aux études supérieures en offrant une aide financière à des étudiants inscrits à la maîtrise ou au doctorat qui désirent réaliser un projet de recherche relié au domaine des sciences naturelles et du génie dans le cadre d'un partenariat université-entreprise.

Dans cette perspective de recherche d'innovation, ce projet de recherche est donc à la fois industriel, financé en partie par AusculTECH Inc. (compagnie canadienne spécialisée dans l'auscultation non destructive des infrastructures de génie civil) et universitaire (Université de Sherbrooke).

L'auscultation des infrastructures dans le domaine de génie civil fait souvent appel à l'utilisation des méthodes dites conventionnelles, ponctuelles et destructives. Ces méthodes procèdent par carottage au prélèvement des échantillons pour des analyses des propriétés physico-chimiques et à la mesure de la résistance à la compression ou à la traction par l'utilisation des techniques mécaniques. Par exemple, l'évaluation de la qualité d'adhérence entre deux bétons, est généralement effectuée au moyen d'un essai d'arrachement pour mesurer la résistance à la traction entre le béton de réparation et le béton du substrat. Ces méthodes ponctuelles, destructives ne permettent pas l'évaluation de grandes superficies de béton et les mesures peuvent affecter l'intégrité des structures auscultées.

La problématique de ce projet de recherche est axée sur la détection des défauts d'interface souvent préjudiciables à la qualité d'adhérence entre deux bétons dans des systèmes de

réparation ou structures anciennes. Nous utiliserons principalement la méthode acoustique vibratoire basée sur l'interprétation des vibrations mécaniques aux basses fréquences, la méthode de la réponse impulsionnelle (RI).

De nombreux travaux ont montré la sensibilité de la méthode de la RI et sa pertinence à détecter des vides, les fissurations, les nids d'abeille, les décollements, les délaminages dus à la corrosion des barres d'armature, etc. dans les dalles de béton. Cependant, les études ont montré également la difficulté de cette méthode à détecter des défauts de très faibles épaisseurs ou faibles décollements, dont l'ouverture de fissuration est inférieure au millimètre, mais aussi sur la possibilité de déterminer ou d'estimer la profondeur des défauts sous les dalles de béton.

L'objectif principal de la thèse est donc de développer un outil de traitement et d'analyse fiable et efficace basé sur la méthode vibratoire de la réponse impulsionnelle pour la détection et la caractérisation de la perte de la qualité d'adhérence entre deux bétons.

Le développement de l'approche de traitement des données de la RI est basé sur l'étude modale et sur l'étude de la réponse forcée ou de la RI. Cette approche a permis de proposer l'évaluation des paramètres d'un défaut tels que la taille et la profondeur de décollement à partir des cartographies de :

- Localisation de la perte de l'adhérence ;
- Estimation de la taille et de la profondeur des défauts en utilisant leurs modes propres et leurs fréquences propres de vibration locale obtenus en faisant une discrimination entre les modes associés à la vibration locale (vibration des défauts) et les modes associés à la vibration globale (vibration des autres composantes de la structure).

Cette approche a été appliquée sur des modèles de dalles numériques et expérimentales. Le défi restera la validation de cette approche sur des structures fonctionnelles.

**Mots-clés : Analyse modale, Défauts d'interface, Méthodes acoustiques, Perte de l'adhérence, Structures de type plaques minces, Vibrations mécaniques, Réponse impulsionnelle.**

# RÉMERCIEMENTS

Mes remerciements vont particulièrement à l'endroit de mes directeurs de thèse Richard GAGNÉ (Directeur), Patrice MASSON (Co-directeur) et Jamal Eddine RHAZI (AusculTECH). Je voudrais leur dire merci, merci pour leur patience, leurs conseils et discussions sur l'orientation à suivre, leur contribution remarquable pour l'aboutissement de ce projet.

Très grand merci à Nicolas QUAEGBEUR pour sa grosse contribution dans la modélisation et la programmation.

Merci à toute l'équipe SHM du laboratoire **GAUS** (Groupe d'Acoustique de l'Université de Sherbrooke) du département de génie mécanique Chantal, Jérémy, Maxime, Valentin, Yannick pour leurs blagues, leur soutien et leur présence permanente au laboratoire comme source de motivation.

Merci aux équipes des laboratoires **CRIB** (Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton) et **GRAI** (Groupe de Recherche en Auscultation et Instrumentation) du département de génie civil. Merci, en particulier à Claude, Rajko, Josée, Zidol et Danick pour leur disponibilité, leur aide dans le processus de conception des dalles expérimentales et des mesures expérimentales.

Merci à ma famille pour sa présence, sa patience et les nombreux sacrifices. Merci à ma fille chérie Selena pour son enthousiasme et sa bonne humeur permanente comme sources de motivation. Papa t'aime Choupie!

Merci à tous ces anonymes et amis, parmi lesquels Dany, Mohammed, Romi, Thierno et William pour leur soutien et leur contribution de près ou de loin à la réussite de ce projet.

Merci aux Fonds de Recherche du Québec – Nature et Technologies (**FRQNT**), au Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et Génie du Canada (**CRSNG**), à la compagnie **AusculTECH Inc.**, pour l'octroi de la bourse de recherche en milieu pratique « **BMP Innovation** » dont j'ai pu bénéficier et qui m'a permis de mener mes travaux à terme.

Merci à tous !

# TABLE DES MATIÈRES

<b>RÉSUMÉ .....</b>	<b>i</b>
<b>RÉMERCIEMENTS.....</b>	<b>iii</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>xix</b>
<b>CHAPITRE 1 INTRODUCTION GÉNÉRALE .....</b>	<b>1</b>
1.1 Introduction .....	1
1.2 Contexte et problématique.....	2
1.3 Définition du sujet de recherche et objectifs .....	7
1.3.1 Objectif principal.....	8
1.3.2 Objectifs spécifiques.....	10
1.4 Organisation de la thèse.....	11
<b>PARTIE A : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE SYSTÈMES DE RÉPARATION - TECHNIQUES</b>	
<b>D'AUSCULTATION .....</b>	<b>14</b>
<b>CHAPITRE 2 PROBLÉMATIQUE DES DÉGRADATIONS DANS UN SYSTÈME DE</b>	
<b>    RÉPARATION ET LEURS CONSÉQUENCES SUR LA QUALITÉ DE</b>	
<b>    L'ADHÉRENCE ENTRE DEUX BÉTONS.....</b>	<b>15</b>
2.1 Introduction .....	15
2.2 Les mécanismes responsables de la perte de l'adhérence entre deux bétons .....	17
2.2.1 Le choix et les propriétés des matériaux.....	20
2.2.2 Les propriétés d'interface entre le béton de réparation et le substrat.....	22
2.3 Propagation de la décohéssion dans les structures en béton.....	23
2.4 Conclusion.....	25
<b>CHAPITRE 3 AUSCULTATION DES INFRASTRUCTURES DE GÉNIE CIVIL ET</b>	
<b>    ÉVALUATION DE LA PERTE DE L'ADHÉRENCE .....</b>	<b>26</b>
3.1 Introduction .....	26
3.2 Auscultation des structures par des techniques dites conventionnelles, destructives et	
semi-destructives.....	27
3.2.1 Les principales méthodes d'évaluation destructives et semi-destructives .....	28
3.2.2 Évaluation de l'adhérence par les techniques mécaniques .....	28
3.2.3 Conclusion .....	31
3.3 Auscultation des structures par les techniques dites de contrôle non destructif (CND) .....	31

3.3.1	Les principales méthodes d'évaluation non-destructive .....	33
3.3.2	Les principales méthodes non destructives d'évaluation de la perte de l'adhérence .....	42
3.3.3	Conclusion .....	44
<b>CHAPITRE 4</b>	<b>APPLICATION DE LA MÉTHODE DE LA RI À LA DÉTECTION DES DÉFAUTS ET À L'ÉVALUATION DE LA DÉCOHÉSION DANS LES STRUCTURES EN BÉTON ET DANS LES PLAQUES MINCES.....</b>	<b>45</b>
4.1	Introduction et historique de la méthode de la Réponse Impulsionnelle .....	45
4.2	Principe et théorie de la méthode de la RI .....	46
4.3	Analyses et interprétations des données .....	49
4.3.1	La rigidité dynamique.....	50
4.3.2	La mobilité moyenne .....	51
4.3.3	Le rapport entre le pic maximal de mobilité et la mobilité moyenne .....	52
4.3.4	La pente de mobilité .....	53
4.4	Travaux antérieurs – Applications – Avantages et Limites .....	55
4.5	Conclusion .....	56
<b>CHAPITRE 5</b>	<b>LA PROPAGATION DES ONDES ACOUSTIQUES ET LES VIBRATIONS MÉCANIQUES DES STRUCTURES DE TYPE PLAQUE.....</b>	<b>58</b>
5.1	Propagation des ondes acoustiques.....	58
5.1.1	Définition des ondes acoustiques.....	58
5.1.2	Caractéristiques d'une onde acoustique.....	59
5.1.3	Propagation des ondes acoustiques dans un milieu homogène, élastique, linéaire et isotrope.....	60
5.2	Vibrations des structures mécaniques.....	63
5.2.1	Vibrations des structures de type plaque mince.....	65
5.2.2	Analyse modale .....	72
5.3	Conclusion .....	75
<b>PARTIE B : MÉTHODOLOGIE – PROGRAMME NUMÉRIQUE – PROGRAMME EXPÉRIMENTAL - RÉSULTATS.....</b>		<b>76</b>
<b>CHAPITRE 6</b>	<b>L'APPROCHE DÉVELOPPÉE POUR LE TRAITEMENT ET L'ANALYSE DES DONNÉES DE LA RI.....</b>	<b>77</b>
6.1	Mise en place et méthodologie de l'approche développée .....	77
6.2	Description de l'approche d'analyse développée .....	80
6.3	Conclusion .....	90
<b>CHAPITRE 7</b>	<b>VALIDATION NUMÉRIQUE DE L'APPROCHE DÉVELOPPÉE .....</b>	<b>91</b>

7.1	Mise en œuvre du modèle numérique.....	91
7.1.1	Modélisation par éléments finis.....	91
7.1.2	Conclusion.....	98
7.2	Exploitation du modèle numérique pour la validation de l'approche développée.....	98
7.2.1	Analyse modale .....	98
7.2.2	Analyse de la réponse forcée .....	103
7.2.3	Étude comparative entre l'analyse modale et l'analyse de la RI.....	103
7.2.4	Conclusion.....	105
7.3	Détection et caractérisation des paramètres du défaut : Diamètre, profondeur .....	105
7.4	Validation de l'approche et caractérisation des paramètres du défaut.....	109
7.5	Conclusion.....	113

## **CHAPITRE 8      ÉTUDE PARAMÉTRIQUE NUMÉRIQUE DE LA PERTE DE L'ADHÉRENCE PAR L'APPROCHE DÉVELOPPÉE ..... 114**

8.1	Présentation de l'étude paramétrique.....	115
8.1.1	Étude pour une dalle saine sans défaut, dalle de référence .....	115
8.1.2	Étude pour différentes tailles du défaut .....	116
8.1.3	Étude pour différentes profondeurs du défaut .....	117
8.1.4	Étude par rapport à la nature de la source d'excitation.....	118
8.1.5	Étude pour différentes positions du défaut dans la dalle .....	118
8.1.6	Étude pour une dalle à multi-défauts .....	119
8.2	Présentation des résultats de l'étude paramétrique .....	119
8.2.1	Cartographies d'analyse modale.....	119
8.2.2	Cartographies selon l'approche développée .....	120
8.2.3	Cartographies selon l'approche conventionnelle .....	125
8.2.4	Cartographies selon l'approche dite « arithmétique » .....	126
8.3	Résultats de l'étude paramétrique.....	127
8.3.1	Étude d'une dalle saine - Dalle de référence .....	127
8.3.2	Cas d'étude d'une dalle avec défaut - Étude pour différentes largeurs ou diamètres du défaut.....	129
8.3.3	Cas d'étude d'une dalle avec défaut - Étude pour différentes profondeurs du défaut .....	139
8.4	Analyse des résultats de l'étude paramétrique.....	149
8.4.1	Analyse modale .....	149
8.4.2	Analyse selon l'approche développée.....	152
8.4.3	Analyse selon l'approche conventionnelle .....	160
8.4.4	Analyse selon l'approche dite « arithmétique ».....	162
8.5	Conclusion.....	163

<b>CHAPITRE 9</b>	<b>MISE EN OEUVRE DU MODÈLE DE VALIDATION EXPÉRIMENTALE DE L'APPROCHE DÉVELOPPÉE.....</b>	<b>165</b>
9.1	Description du programme expérimental .....	165
9.1.1	Étapes de fabrication des dalles .....	168
9.1.2	Mesures des caractéristiques mécaniques des dalles .....	179
9.2	Description du matériel et configuration des mesures de la RI .....	182
9.2.1	Le matériel de mesure.....	182
9.2.2	Vérification du fonctionnement du matériel et validation des données .....	186
9.3	Matériel et configuration des mesures des autres méthodes non destructives utilisées .....	188
9.3.1	Thermographie infrarouge .....	188
9.3.2	Essai sonore .....	190
9.3.3	Géoradar .....	191
9.4	Conclusion.....	192
<b>CHAPITRE 10</b>	<b>VALIDATION EXPÉRIMENTALE DE L'APPROCHE DÉVELOPPÉE .....</b>	<b>193</b>
10.1	Validation de l'approche développée - Dalle expérimentale numéro 3.....	195
10.1.1	Résultats expérimentaux : Courbes de mobilité spectrale .....	195
10.1.2	Étude comparative - Validation du modèle numérique par l'approche expérimentale .....	196
10.1.3	Validation de l'approche développée – Résultats expérimentaux et numériques .....	197
10.1.4	Validation de l'approche développée par les autres méthodes d'auscultation .....	200
10.2	Validation de l'approche développée - Dalle expérimentale numéro 1 .....	201
10.2.1	Résultats expérimentaux : Courbes de mobilité spectrale .....	201
10.2.2	Étude comparative - Validation du modèle numérique par l'approche expérimentale .....	202
10.2.3	Validation de l'approche développée – Résultats expérimentaux et numériques .....	204
10.2.4	Validation de l'approche développée par les autres méthodes d'auscultation .....	207
10.3	Validation de l'approche développée - Dalle expérimentale numéro 4.....	207
10.3.1	Résultats expérimentaux : Courbes de mobilité spectrale .....	207
10.3.2	Étude comparative - Validation du modèle numérique par l'approche expérimentale .....	208
10.3.3	Validation de l'approche développée – Résultats expérimentaux et numériques .....	209
10.3.4	Validation de l'approche développée par les autres méthodes d'auscultation .....	212
10.4	Conclusion.....	213
<b>CHAPITRE 11</b>	<b>ÉTUDE PARAMÉTRIQUE EXPÉRIMENTALE DE LA PERTE DE L'ADHÉRENCE PAR L'APPROCHE DÉVELOPPÉE .....</b>	<b>214</b>
11.1	Présentation de l'étude paramétrique.....	215
11.1.1	Étude paramétrique par rapport à la nature de la source .....	216
11.1.2	Étude paramétrique pour des dalles avec des barres d'armature .....	216
11.1.3	Étude paramétrique par rapport à la profondeur du défaut .....	217



11.1.4	Étude paramétrique par rapport à l'effet de bord .....	218
11.1.5	Étude paramétrique par rapport à la position et au nombre des défauts .....	219
11.1.6	Étude paramétrique par rapport à la gamme de fréquence de traitement .....	220
11.2	Présentation des résultats de l'étude paramétrique .....	221
11.2.1	Cartographies selon l'approche développée .....	221
11.2.2	Cartographies selon l'approche conventionnelle .....	222
11.2.3	Cartographies selon l'approche dite « arithmétique » .....	223
11.2.4	Cartographies selon l'essai sonique .....	224
11.2.5	Cartographies selon la technique Géoradar (GPR).....	224
11.3	Résultats de l'étude paramétrique.....	225
11.3.1	Étude par rapport à la nature de la source.....	225
11.3.2	Étude paramétrique : Dalles avec des barres d'armature .....	232
11.3.3	Étude paramétrique : Profondeur du défaut .....	240
11.3.4	Étude paramétrique : Effet de bords .....	250
11.3.5	Étude paramétrique : Position et nombre des défauts dans la dalle - Dalle expérimentale N°5.....	253
11.4	Analyse des résultats de l'analyse paramétrique .....	259
11.4.1	Étude paramétrique par rapport à la nature de la source .....	259
11.4.2	Étude paramétrique pour des dalles avec barres d'armature.....	261
11.4.3	Étude paramétrique par rapport à la profondeur du défaut .....	262
11.4.4	Étude paramétrique par rapport à l'effet de bord.....	265
11.4.5	Étude paramétrique par rapport à la position et au nombre des défauts .....	267
11.4.6	Étude paramétrique par rapport à la gamme de fréquence de traitement.....	268
11.5	Conclusion.....	269
<b>CHAPITRE 12</b>	<b>CONCLUSIONS GÉNÉRALES, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>274</b>
12.1	Conclusions générales .....	274
12.2	Recommandations et perspectives .....	278
<b>LISTE DE RÉFÉRENCES.....</b>		<b>281</b>
<b>ANNEXE A</b>	<b>VALIDATION NUMÉRIQUE DE L'APPROCHE DÉVELOPPÉE.....</b>	<b>285</b>
<b>ANNEXE B</b>	<b>VALIDATION EXPÉRIMENTALE DE L'APPROCHE DÉVELOPPÉE .....</b>	<b>300</b>
<b>ANNEXE C</b>	<b>VALIDATION DE L'APPROCHE DÉVELOPPÉE – Application : Détection des vides entre les blocs de granites et un mur de béton .....</b>	<b>320</b>
<b>ANNEXE D</b>	<b>ÉTAPES DE L'APPROCHE D'ANALYSE DÉVELOPPÉE .....</b>	<b>323</b>

# LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 :	Exemples de dégradations dans les structures en béton. ....	3
Figure 1.2 :	Anatomie d'une réparation de surface [3].....	4
Figure 1.3 :	Réparation sur toute l'épaisseur d'une dalle [49]. ....	5
Figure 1.4 :	Réparation d'une sous-face délaminée [49].....	5
Figure 1.5 :	Réparation d'une surface délaminée [49]. ....	6
Figure 1.6 :	Réparation d'une colonne délaminée [49]. ....	6
Figure 1.7 :	Réparation d'un mur en béton délaminé [49]. ....	6
Figure 2.1 :	La perte de contact entre la dalle et la fondation due au retrait différentiel [1, 7]. ....	17
Figure 2.2 :	Deux causes fondamentales de la perte d'adhérence : (a) due aux effets flexuraux, (b) due aux déformations différentielles [1,7].....	18
Figure 2.3 :	Classification de l'adhérence en trois groupes : Adhérence parfaite (gauche), Adhérence incertaine (centre), Perte de l'adhérence ou décollement (droite) [1, 8]. ....	18
Figure 2.4 :	Principes de la théorie d'adhérence [1, 8]. ....	19
Figure 2.5 :	L'adhérence mécanique en traction (gauche) et en cisaillement entre un substrat et un revêtement [1, 8]. ....	19
Figure 2.6 :	Principaux facteurs contrôlant la durabilité des réparations [9]. ....	20
Figure 2.7 :	Influence des changements volumétriques sur les réparations [9]. ....	21
Figure 2.8 :	Mécanismes d'adhérence [10].....	22
Figure 2.9 :	Propagation du décollement en fonction de l'ouverture de la fissuration [8]. ....	24
Figure 2.10 :	Décollement en fonction de l'ouverture de la fissuration [8]. ....	25
Figure 3.1 :	Méthodes d'évaluation de l'adhérence entre deux matériaux [1, 8]. ....	29
Figure 3.2 :	Essai pull-off – Principe [16]. ....	30
Figure 3.3 :	Essai Pull-Off - Différents modes de rupture [16]. ....	31
Figure 4.1 :	Principe de la méthode de la RI (ASTM C1740) [23].....	46
Figure 4.2 :	Exemple de courbe théorique de la mobilité d'un pieu parfait reposant sur un sol homogène [18]. ....	48
Figure 4.3 :	Représentation schématisée d'une dalle de béton supportée par un sol, caractérisée par des vides entre la dalle et le sol, et des nids d'abeille dans la dalle de béton [23]. ....	50
Figure 4.4 :	Représentation de la courbe de mobilité à partir d'un point de mesure – Calcul de la rigidité dynamique à partir de la pente comprise entre 0 et 100 Hz [30]. ....	51
Figure 4.5 :	Courbes de mobilité d'un béton sain (sound) et d'un béton dégradé (honeycomb) [27]. ....	52
Figure 4.6 :	Courbes de mobilité spectrale d'un béton sain (courbe en pointillés) et d'un béton dégradé (courbe en trait plein) [23]. ....	53
Figure 4.7 :	Courbes de mobilité spectrale entre une zone faiblement consolidée (High mobility slope) et une zone de béton sain (Normal mobility slope) [23]. ....	54

Figure 5.1 :	Front d'onde généré par une source ponctuelle dans un milieu semi-infini, homogène, élastique et isotrope [38].....	60
Figure 5.2 :	Modes de propagation, Onde longitudinale (P), Onde transversale (S) [32].....	61
Figure 5.3 :	Ondes de surface, onde de Love (L) et Onde Rayleigh (R) [32].....	62
Figure 5.4 :	Position d'équilibre statique et mouvement vibratoire [40]. ....	63
Figure 5.5 :	Plaque mince [42]. ....	66
Figure 5.6 :	Calcul des déplacements horizontaux [42].....	66
Figure 5.7 :	Sommation des forces par rapport à z [42]. ....	70
Figure 5.8 :	Sommation des moments par rapport à l'axe y [42]. ....	71
Figure 5.9 :	Déformée propre du mode (1, 1), A - Image tridimensionnelle, B – Représentation par le tracé des lignes nodales (aucune pour ce mode) [40]. ....	74
Figure 5.10 :	Déformée propre du mode (2, 1), A - Image tridimensionnelle, B – Représentation par le tracé des lignes nodales [40]. ....	74
Figure 6.1 :	A - Schématisation d'une plaque constituée d'un défaut, B – Plaque mince vibrante constituée du défaut à sa base. ....	78
Figure 6.2 :	Schéma de synthèse du programme d'analyse .....	81
Figure 6.3 :	Configuration de mesures RI dans une structure.....	82
Figure 7.1 :	Modèle numérique - Plaque rectangulaire avec un défaut au centre. ....	93
Figure 7.2 :	Exemple de maillage – Modèle d'une dalle de béton avec défaut au centre. ....	94
Figure 7.3 :	Résultat de l'analyse modale d'une dalle avec un défaut au centre. ....	97
Figure 7.4 :	Résultat de l'analyse forcée (Courbes de mobilité spectrale).....	97
Figure 7.5 :	Quelques modes de vibration (Analyse modale) – Simulation 1. ....	100
Figure 7.6 :	Quelques modes de vibration (Analyse modale) – Simulation 2. ....	101
Figure 7.7 :	Quelques modes de vibration (Analyse modale) – Simulation 3. ....	102
Figure 7.8 :	Comparaison - Analyses modale et Réponse impulsionnelle – Dalle avec un défaut de 80 cm * 80 cm * 0,2 cm. ....	104
Figure 7.9 :	Comparaison - Analyses modale et Réponse impulsionnelle – Dalle avec un défaut de 100 cm * 100 cm * 0,2 cm. ....	104
Figure 7.10 :	Comparaison - Analyses modale et Réponse impulsionnelle – Dalle avec un défaut de 150 cm * 150 cm * 0,2 cm. ....	105
Figure 7.11 :	Variation de la première fréquence propre du défaut en fonction de la taille du défaut.....	106
Figure 7.12 :	Analyse modale en fonction de la profondeur du défaut.....	107
Figure 7.13 :	Variation de la première fréquence propre du défaut en fonction de la profondeur (défaut de dimensions de 100 cm * 100 cm * 0,2 mm).....	108
Figure 7.14 :	Vibration de la partie située au-dessus du défaut – Analyse modale 3D.....	109
Figure 7.15 :	Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection – Cartographie de la vibration globale de la dalle.....	110

Figure 7.16 :	Cartographie des mobilités – Cartographie pour l’estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 210 Hz. ....	112
Figure 7.17 :	Cartographie des mobilités – Cartographie pour l’estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 280 Hz (mode 1). ....	112
Figure 7.18 :	Cartographie des mobilités – Cartographie pour l’estimation moyenne du diamètre et la profondeur du défaut à partir des cartographies des Figures 7.16, 17. ....	113
Figure 8.1 :	Résumé de la structure du chapitre 8. ....	115
Figure 8.2 :	Cartographie des modes propres – Dalle saine. ....	127
Figure 8.3 :	Analyse 1 – Cartographie des mobilités – Dalle saine ....	128
Figure 8.4 :	Analyse 2 – Cartographie des mobilités – Cartographie de la vibration globale de la dalle – Dalle saine. ....	128
Figure 8.5 :	Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilité moyenne - B : Pente de la mobilité. ....	129
Figure 8.6 :	Approche « arithmétique » – Mobilité moyenne.....	129
Figure 8.7 :	Analyse modale – Cartographie des modes propres.....	130
Figure 8.8 :	Analyse 1 – Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection – Cartographie de la vibration globale de la dalle. ....	130
Figure 8.9 :	Analyse 1 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 420 Hz.....	131
Figure 8.10 :	Analyse 1 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 480 Hz.....	131
Figure 8.11 :	Analyse 2 – Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection – Cartographie de la vibration globale de la dalle. ....	132
Figure 8.12 :	Analyse 2 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour l’estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 420 Hz (mode 1).....	132
Figure 8.13 :	Analyse 2 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour l’estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 480 Hz (mode 2).....	133
Figure 8.14 :	Analyse 2 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour l’estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration moyenne de 450 Hz. ....	133
Figure 8.15 :	Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes – B : Rigidité dynamique – C : Indice du vide – D : Pente de la mobilité.....	134
Figure 8.16 :	Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes. ....	134
Figure 8.17 :	Analyse modale – Cartographie des modes propres.....	135
Figure 8.18 :	Analyse 1 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection. ....	135
Figure 8.19 :	Analyse 1 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 90 Hz.....	136
Figure 8.20 :	Analyse 2 – Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection – Cartographie de la vibration globale de la dalle. ....	136

Figure 8.21 :	Analyse 2 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour l’estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 90 Hz (mode 1).....	137
Figure 8.22 :	Analyse 2 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour l’estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 180 Hz. ....	137
Figure 8.23 :	Analyse 2 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour l’estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration moyenne de 135 Hz. ....	138
Figure 8.24 :	Approche conventionnelle : Cartographies – A : Rigidité dynamique – B : Pente de la mobilité.....	138
Figure 8.25 :	Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes. ....	139
Figure 8.26 :	Analyse modale – Cartographie des modes propres.....	139
Figure 8.27 :	Analyse 1 – Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection – Cartographie de la vibration globale de la dalle. ....	140
Figure 8.28 :	Analyse 1 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour l’estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 480 Hz (mode 1).....	140
Figure 8.29 :	Analyse 1 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour l’estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 560 Hz. ....	141
Figure 8.30 :	Analyse 1 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour l’estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration moyenne de 520 Hz. ....	141
Figure 8.31 :	Analyse 2 – Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection – Cartographie de la vibration globale de la dalle. ....	142
Figure 8.32 :	Analyse 1 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour l’estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 480 Hz (mode 1).....	142
Figure 8.33 :	Analyse 1 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour l’estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 560 Hz. ....	143
Figure 8.34 :	Analyse 1 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour l’estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration moyenne de 520 Hz. ....	143
Figure 8.35 :	Approche conventionnelle : Cartographies – A : Rigidité dynamique –B : Pente de la mobilité.....	143
Figure 8.36 :	Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes. ....	144
Figure 8.37 :	Analyse modale – Cartographie des modes propres.....	144
Figure 8.38 :	Analyse 1 – Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection – Cartographie de la vibration globale de la dalle. ....	145
Figure 8.39 :	Analyse 1 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 100 Hz.....	145
Figure 8.40 :	Analyse 1 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 200 Hz.....	146
Figure 8.41 :	Analyse 2 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection. ....	146

Figure 8.42 :	Analyse 2 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 150 Hz.....	147
Figure 8.43 :	Analyse 2 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 150 Hz.....	147
Figure 8.44 :	Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes – B : Rigidité dynamique – C : Indice du vide – D : Pente de la mobilité.....	148
Figure 8.45 :	Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes.....	148
Figure 9.1 :	Matériaux : (a) Sable, (b) Granulats P5-14, (c) Granulats P20, (d) Ciment ordinaire GU.....	168
Figure 9.2 :	Préparation des moules.....	170
Figure 9.3 :	Préparation du béton, (a) Malaxeur de 0,15 m <sup>3</sup> , (b) Gros malaxeur usine de béton de 0,5 m <sup>3</sup> , (c) Malaxage du béton.....	171
Figure 9.4 :	Mesures sur le béton, (a) L'affaissement du béton à l'aide du Cône d'Adams, (b) Mesure de l'air contenu dans le béton, (c) Mesures de la masse et de la densité du béton.....	173
Figure 9.5 :	Défaut simulé de polyéthylène.....	175
Figure 9.6 :	Dalle expérimentale N° 1- Protocole de fabrication.....	176
Figure 9.7 :	Dalle N° 4, (a) Mise en place du béton, (b) Remplissage du moule, (c) Dalle monolithique finale.....	177
Figure 9.8 :	Dalle N° 8, (a) Mise en place des barres d'armature et du défaut, (b) Remplissage du moule, (c) Dalle monolithique finale.....	177
Figure 9.9 :	Mise en place des dalles (a) et des cylindres (b) dans la chambre humide.....	178
Figure 9.10 :	Sortie de la chambre humide (a), démoulage puis séchage des dalles (b) et cylindres (c).....	178
Figure 9.11 :	Opération de polissage des cylindres de béton à l'aide d'une surfaceuse.....	179
Figure 9.12 :	Mesure de la résistance à la compression à l'aide d'une presse spécialisée.....	180
Figure 9.13 :	Mesure du module d'élasticité à l'aide d'une presse de marque MTS.....	181
Figure 9.14 :	Matériel d'acquisition de la méthode la RI.....	183
Figure 9.15 :	Géophone de type GS-20DX.....	184
Figure 9.16 :	Les différentes sources d'énergie, 1- Embout en acier inoxydable, 2- Embout en aluminium, 3- Embout en PVC et 4- Marteau muni d'un capteur de force.....	186
Figure 9.17 :	Formes des signaux valables : signal temporel de force en haut à droite), signal temporel de vitesse (en haut à gauche), signal fréquentiel de force (en bas) [3].....	187
Figure 9.18 :	Forme d'onde non valable causée par l'instabilité du géophone : signal temporel de force en haut à droite), signal temporel de vitesse (en haut à gauche), signal fréquentiel de force (en bas) [3].....	187
Figure 9.19 :	Signaux enregistrés par le système d'acquisition HS4 Multichannel, (a) signaux (vitesse et force) dans le domaine temporel, (b) signaux (vitesse, force et mobilité) dans le domaine fréquentiel.....	188

Figure 9.20 :	Caméra de thermographie infrarouge « VarioCAM high resolution ».	189
Figure 9.21 :	Mesures par thermographie infrarouge.	189
Figure 9.22 :	Matériel d'Essai sonique.	190
Figure 9.23 :	Configuration et mesures soniques sur les dalles expérimentales.	191
Figure 9.24 :	Matériel de mesure de la technique géoradar.	192
Figure 10.1 :	Configuration des mesures – Dalle posée sur des parpaings – Dalle expérimentale N° 1.	194
Figure 10.2 :	Résultats expérimentaux – Courbes de mobilité spectrale – Dalle expérimentale N°3 – Dalle saine.	195
Figure 10.3 :	Validation d'approches : Analyse modale – RI (expérimentale et numérique) – Mesure au centre de la dalle – Dalle expérimentale N° 3.	196
Figure 10.4 :	Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 1760 Hz – Approche numérique.	198
Figure 10.5 :	Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Approche numérique.	198
Figure 10.6 :	Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 90 Hz – Approche expérimentale.	199
Figure 10.7 :	Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 600 Hz – Approche expérimentale.	199
Figure 10.8 :	Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Approche expérimentale.	200
Figure 10.9 :	Résultats expérimentaux – Courbes de mobilité spectrale – Dalle expérimentale N° 1.	202
Figure 10.10 :	Validation d'approches : Analyse modale – RI (Expérimentale et numérique) – Mesure au centre de la dalle – Dalle expérimentale N°1.	203
Figure 10.11 :	Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Approche numérique.	204
Figure 10.12 :	Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Approche expérimentale.	205
Figure 10.13 :	Cartographie des mobilités – Cartographie pour l'estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 1430 Hz – Approche numérique.	206
Figure 10.14 :	Cartographie des mobilités – Cartographie pour l'estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 1470 Hz – Approche expérimentale.	206
Figure 10.15 :	Résultats expérimentaux – Courbes de mobilité spectrale – Dalle expérimentale N°4.	208
Figure 10.16 :	Validation d'approches : Analyse modale – RI (Expérimentale et numérique) – Mesure au centre de la dalle – Dalle expérimentale N°4.	209
Figure 10.17 :	Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 480 Hz – Approche numérique.	210
Figure 10.18 :	Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Approche expérimentale.	210
Figure 10.19 :	Cartographie des mobilités – Cartographie pour l'estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 450 Hz – Approche numérique.	211

Figure 10.20 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour l’estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 432 Hz – Approche expérimentale. ....	212
Figure 11.1 : Résumé de la structure du chapitre 11. ....	215
Figure 11.2 : Répartition des défauts dans la dalle – Dalle expérimentale N° 5.....	219
Figure 11.3 : Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection Cartographie de la vibration globale de la dalle.....	225
Figure 11.4 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 720 Hz. ....	225
Figure 11.5 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 1500 Hz. ....	226
Figure 11.6 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes – B : Rigidité dynamique – C : Indice du vide – D : Pente de la mobilité.....	227
Figure 11.7 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes – B : Rigidité dynamique – C : Indice du vide – D : Pente de la mobilité.....	227
Figure 11.8 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes. ....	227
Figure 11.9 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes. ....	228
Figure 11.10 : Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection Cartographie de la vibration globale de la dalle.....	228
Figure 11.11 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour l’estimation de la taille et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 1560 Hz.....	229
Figure 11.12 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes – B : Indice du vide – C : Pente de la mobilité. ....	229
Figure 11.13 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes – B : Indice du vide – C : Pente de la mobilité. ....	230
Figure 11.14 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes. ....	230
Figure 11.15 : Approche « arithmétique » - Mobilité moyenne. ....	231
Figure 11.16 : Détection de la qualité de l’adhérence par Géoradar (GPR) – Imagerie 2D Défaut placé à 5 cm de profondeur de la dalle – Dalle N° 2.....	231
Figure 11.17 : Détection de la qualité de l’adhérence par Géoradar (GPR) – Défaut placé à 5 cm de profondeur de la dalle - Dalle N° 2.....	232
Figure 11.18 : Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection Cartographie de la vibration globale de la dalle.....	232
Figure 11.19 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 630 Hz. ....	233
Figure 11.20 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 1410 Hz. ....	233
Figure 11.21 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes – B : Rigidité dynamique – C : Indice du vide – D : Pente de la mobilité.....	234



Figure 11.22 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes. ....	234
Figure 11.23 : Détection de la qualité de l'adhérence par Géoradar (GPR) – Imagerie 2D Dalle sans défaut des barres d'armature placées à 5 cm de profondeur – Dalle N° 7. ....	235
Figure 11.24 : Détection de la qualité de l'adhérence par Géoradar (GPR) – Imagerie 3D Dalle sans défaut avec huit barres d'armature horizontales dans les deux directions orthogonales placées à 5 cm de profondeur – Dalle N° 7. ....	235
Figure 11.25 : Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection Cartographie de la vibration globale de la dalle. ....	236
Figure 11.26 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 1560 Hz. ....	236
Figure 11.27 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes – B : Rigidité dynamique – C : Indice du vide – D : Pente de la mobilité. ....	237
Figure 11.28 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes - B : Rigidité dynamique – C : Indice du vide – D : Pente de la mobilité. ....	237
Figure 11.29 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes. ....	238
Figure 11.30 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes. ....	238
Figure 11.31 : Détection de la qualité de l'adhérence par Géoradar (GPR) – Imagerie 2D Dalle avec un défaut des barres d'armature placées à 5 cm de profondeur – Dalle N° 8. ....	239
Figure 11.32 : Détection de la qualité de l'adhérence par Géoradar (GPR) – Dalle avec un défaut et huit barres d'armature horizontales dans les deux directions orthogonales placées à 5 cm de profondeur - Dalle N° 8. ....	239
Figure 11.33 : Cartographie des mobilités moyennes obtenue à partir de la fréquence vibratoire globale moyenne de la dalle - Détection et estimation du diamètre du défaut. ....	240
Figure 11.34 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 690 Hz. ....	240
Figure 11.35 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 2070 Hz. ....	241
Figure 11.36 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes - B : Rigidité dynamique – C : Indice du vide – D : Pente de la mobilité. ....	241
Figure 11.37 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes. ....	242
Figure 11.38 : Détection de la qualité de l'adhérence par Géoradar (Imagerie 2D) –Défaut placé à 15 cm de profondeur de la dalle – Dalle N° 8. ....	242
Figure 11.39 : Détection de la qualité de l'adhérence par Géoradar – Défaut placé à 15 cm de profondeur de la dalle - Dalle N° 8. ....	243
Figure 11.40 : Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection Cartographie de la vibration globale de la dalle. ....	243
Figure 11.41 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 660 Hz. ....	244

Figure 11.42 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 1590 Hz. ....	244
Figure 11.43 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes – B : Indice du vide – C : Pente de la mobilité. ....	245
Figure 11.44 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes – B : Indice du vide – C : Pente de la mobilité. ....	245
Figure 11.45 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes. ....	246
Figure 11.46 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes. ....	246
Figure 11.47 : Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection Cartographie de la vibration globale de la dalle. ....	247
Figure 11.48 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 720 Hz. ....	247
Figure 11.49 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 1440 Hz. ....	248
Figure 11.50 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes – B : Rigidité dynamique – C : Indice du vide – D : Pente de la mobilité. ....	248
Figure 11.51 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes. ....	249
Figure 11.52 : Détection de la qualité de l'adhérence par Géoradar (Imagerie 2D) – Imagerie 2D Défaut placé à 15 cm de profondeur de la dalle – Dalle expérimentale N° 4. ....	249
Figure 11.53 : Détection de la qualité de l'adhérence par Géoradar – Défaut placé à 15 cm de profondeur de la dalle - Dalle expérimentale N° 4. ....	250
Figure 11.54 : Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection Cartographie de la vibration globale de la dalle. ....	250
Figure 11.55 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 660 Hz. ....	251
Figure 11.56 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 1590 Hz. ....	251
Figure 11.57 : Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection Cartographie de la vibration globale de la dalle. ....	252
Figure 11.58 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour l'estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 750 Hz. ....	252
Figure 11.59 : Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection Cartographie de la vibration globale de la dalle. ....	253
Figure 11.60 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 930 Hz. ....	253
Figure 11.61 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 1470 Hz. ....	254

Figure 11.62 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 2310 Hz. ....	254
Figure 11.63 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes – B : Rigidité dynamique – C : Indice du vide – D : Pente de la mobilité. ....	255
Figure 11.64 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes – B : Rigidité dynamique – C : Indice du vide – D : Pente de la mobilité. ....	256
Figure 11.65 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes. ....	256
Figure 11.66 : Détection de la qualité de l'adhérence par Essai sonique – Mesure des vitesses des ondes de compression - Dalle expérimentale N° 5. ....	257
Figure 11.67 : Détection de la qualité de l'adhérence par Essai sonique – Mesure des vitesses des ondes de compression – Dalle expérimentale N° 5. ....	257
Figure 11.68 : Détection de la qualité de l'adhérence par Géoradar (GPR) – Imagerie 2D Défaut placé à 5 cm de profondeur de la dalle – Dalle N° 5. ....	258
Figure 11.69 : Détection de la qualité de l'adhérence par Géoradar (GPR) – Défaut placé à 5 cm de profondeur de la dalle - Dalle N° 5. ....	258

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 :	Principaux phénomènes à l'origine des dégradations dans le béton et dans l'acier d'armature (ENV 15049 :1997) [1.2].....	16
Tableau 2.3 :	Défauts associés aux dégradations des dalles de chaussée en béton (CRR 9991) [1,2].	23
Tableau 3.1 :	Principales méthodes utilisées pour le contrôle du béton (Malhotra, 1991) [18].	43
Tableau 5.1 :	Fréquences propres, cas d'une plaque encastree	73
Tableau 5.2 :	Fréquences propres, cas d'une plaque simplement supportée.	73
Tableau 6.1 :	Extrait des données numériques de la RI – Mobilités spectrales en fonction de la fréquence. ....	84
Tableau 6.2 :	Extrait des données expérimentales de la RI – Force (V) en fonction de la fréquence (Hz) (Tableau 6.2, A), Vitesses vibratoires (V) en fonction de la fréquence (HZ) (Tableau 6.2, B). ....	85
Tableau 7.1 :	Propriétés mécaniques des matériaux. ....	94
Tableau 7.2 :	Paramètres d'analyse de l'approche développée. ....	110
Tableau 8.1 :	Dimensions et propriétés mécaniques de la dalle. ....	116
Tableau 8.2 :	Étude par rapport à la taille du défaut. ....	116
Tableau 8.3 :	Étude par rapport à la profondeur du défaut. ....	118
Tableau 8.4 :	Paramètres d'analyse de l'approche développée, pour le cas d'une dalle saine. ....	121
Tableau 8.5 :	Paramètres d'analyse de l'approche développée – Défaut de dimensions : 80 cm * 80 cm * 0,2 mm. ....	121
Tableau 8.6 :	Paramètres d'analyse de l'approche développée – Défaut de dimensions : 180 cm * 180 cm * 0,2 mm. ....	122
Tableau 8.7 :	Paramètres d'analyse de l'approche développée – Défaut de dimensions : 80 cm * 80 cm * 0,2 mm placé à 10cm de profondeur. ....	122
Tableau 8.8 :	Paramètres d'analyse de l'approche développée – Défaut de dimensions : 180 cm * 180 cm * 0,2 mm placé à 15 cm de profondeur. ....	123
Tableau 9.1 :	Récapitulatif des dalles fabriquées. ....	167
Tableau 9.2 :	Caractéristiques des matériaux pour une gâchée de 0,5 m <sup>3</sup> . ....	169
Tableau 9.3 :	Mesures des caractéristiques du béton – Dalle N° 4. ....	172
Tableau 9.4 :	Caractéristiques des barres d'armature. ....	176
Tableau 9.5 :	Résumé des propriétés mécaniques du béton des dalles. ....	182
Tableau 9.6 :	Différents types d'embouts et leur gamme de fréquences générée (Gassman, 1997) [35]. ....	185
Tableau 9.7 :	Différents types de sources (embouts) utilisées selon la norme ASTM C1740. ....	186
Tableau 9.8 :	Classification du béton selon la vitesse de propagation (m/s) (Solis-Carcano et Moreno, 2008). ....	191

Tableau 11.1 : Caractéristiques des matériaux et conditions de mesures de la RI .....	216
Tableau 11.2 : Caractéristiques des matériaux et conditions des mesures de la RI.....	217
Tableau 11.3 : Caractéristiques des matériaux et conditions des mesures de la RI.....	218
Tableau 11.4 : Caractéristiques des matériaux et conditions des mesures de la RI.....	219
Tableau 11.5 : Caractéristiques des matériaux et conditions des mesures de la RI – Dalle expérimentale N°5 .....	220
Tableau 11.6 : Tableau récapitulatif des méthodes d’auscultation : Avantages et limites. ....	273

# CHAPITRE 1

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

### 1.1 Introduction

La détérioration des infrastructures de génie civil est un problème majeur qui préoccupe les ingénieurs notamment sur la capacité à maintenir leur état de service et la capacité à développer et à mettre en place des méthodes d'auscultation les mieux adaptées, économiques, efficaces et de très grande précision à la détection et à l'évaluation notamment de la qualité de l'adhérence dans les structures de réparation ou dans des structures existantes.

Le nombre de structures en béton étant continuellement en hausse, on assiste depuis plusieurs décennies à une forte augmentation des travaux d'entretien et de réparation des infrastructures notamment celles construites au lendemain de la Seconde Guerre mondiale. Pour maintenir la durabilité de ces structures, les travaux de réparation consistent souvent à remplacer un béton détérioré ou contaminé par un nouveau béton en fonction de l'état de dégradation de la structure sur un béton original ou un ancien béton. La qualité de l'adhérence va dépendre de la préparation de la surface de réparation et les conditions de mise en place du nouveau béton. Les décollements des dalles se développent généralement au niveau des frontières des couches et joints. Ces décollements résultent d'un couplage entre les contraintes internes induites par les charges gravitationnelles, le séchage différentiel et les changements thermiques entre la nouvelle couche et le substrat. Les fissures engendrées peuvent ainsi avoir des conséquences néfastes sur l'intégrité de la structure [1].

Il faut dire que le problème de la qualité ou de la perte de l'adhérence entre deux bétons concerne une variété de structures en béton. Dans ce projet de recherche, nous allons uniquement nous focaliser sur les problématiques des décollements qui affectent les structures de type plaques minces, à savoir les dalles de tabliers de ponts, les dalles de chaussées, des dalles sur sol, des

dalles de murs de soutènement, les dalles de tunnels ou encore les dalles des barrages, dont les épaisseurs sont de l'ordre de 20 cm.

Le grand défi aujourd'hui, et pour les années à venir, pour les ingénieurs et la communauté scientifique, est de mettre en place des méthodes qui permettent au mieux de détecter, de caractériser et d'évaluer cette perte d'adhérence sans causer des endommagements conséquents ou affecter l'intégrité structurale des ouvrages, comme c'est le cas des méthodes conventionnelles.

Les avancées technologiques de ces dernières décennies ont permis le développement et la mise en place des nouvelles méthodes d'inspections des structures. Ce sont les méthodes dites non destructives, en anglais connues sous l'appellation *Non-Destructive Testing* (NDT). Ces méthodes connaissent une percée remarquable dans l'auscultation des ouvrages de génie civil et sont de plus en plus sollicitées pour détecter tous types de défauts dans les dalles. Parmi les méthodes non destructives pertinentes qui permettent de détecter les vides, la fissuration, le délaminage du béton, la perte de qualité du support ou la perte d'adhérence dans un système de réparation ou dans des ouvrages opérationnels, la méthode acoustique de la réponse impulsionnelle (RI) est parmi l'une des plus prometteuses.

Dans cette thèse, nous explorerons le potentiel en laboratoire de quelques méthodes de contrôle non destructif en l'occurrence les méthodes radar, de thermographie infrarouge, d'essai sonique et particulièrement la méthode de la RI pour l'évaluation de la qualité d'adhérence entre deux bétons. Cette thèse vise notamment à mieux comprendre la capacité de la méthode de la RI à détecter des défauts préjudiciables à l'intégrité des structures en se basant sur une étude paramétrique détaillée et en proposant une nouvelle approche de traitement et d'interprétation des données incluant, d'une part, une étude numérique et d'autre part, un programme expérimental.

## **1.2 Contexte et problématique**

Le problème des réparations touche tous les ouvrages en béton : les tabliers de ponts, les dalles de stationnement, les dalles de chaussée, les dalles de chemin de fer, les murs de soutènement, les dalles dans les structures de barrages, etc. Toutes ces réparations nécessitent la mobilisation

des moyens notamment financiers importants. Le défi actuel pour les gouvernants est de minimiser les coûts de réparations et de trouver des techniques de réparation et d'auscultation peu coûteuses, efficaces, rapides, capables d'opérer sur de larges surfaces sans affecter l'intégrité structurale de l'ouvrage.

Les premiers travaux de réparation des structures en béton datent d'environ un siècle. Les travaux réalisés sur des dalles de tabliers de ponts et des dalles de chaussées consistaient à remplacer des couches de béton affectées par de nombreuses dégradations par un nouveau béton. Le but était souvent d'augmenter la rigidité structurale, de remplacer le béton détérioré à cause de la corrosion des barres d'armature et/ou enfin d'offrir une meilleure qualité architecturale des infrastructures [1, 2].

Les structures en béton peuvent être affectées par des dégradations multiples parmi lesquelles on retrouve : les fissurations, les vides, les nids d'abeille, le délaminage du béton, l'écaillage, la corrosion des barres d'armature, les dégradations dues à la présence de l'humidité, les dégradations liées aux phénomènes du gel-dégel, de la carbonatation, des ions sulfates, de la réaction alcali-granulats, etc. La **Figure 1.1** présente quelques illustrations des dégradations dans les structures en béton.

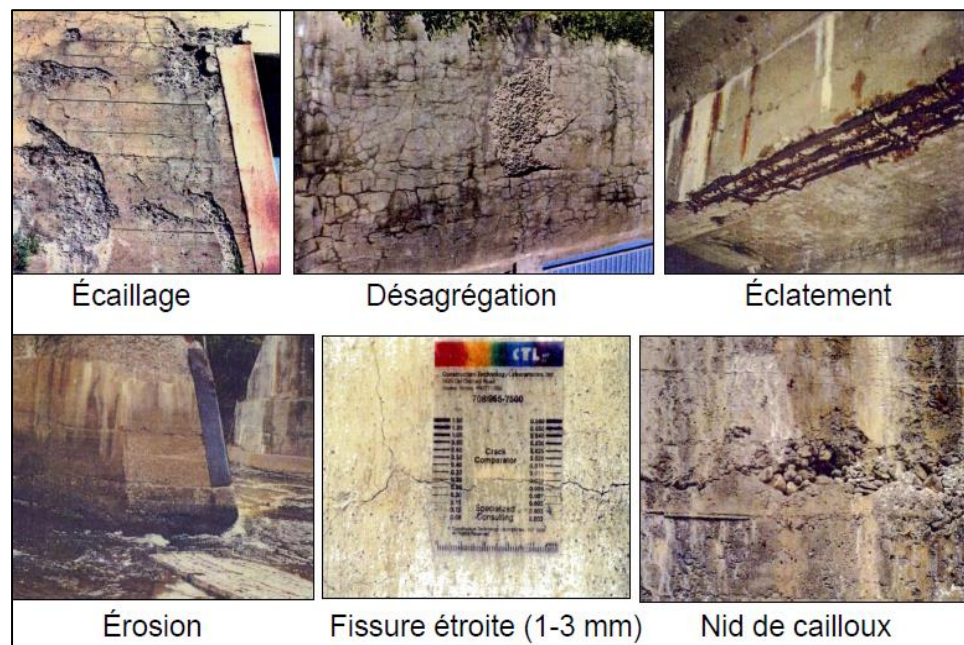


Figure 1.1 : Exemples de dégradations dans les structures en béton.



Ces dégradations à court, moyen et long terme peuvent affecter les propriétés responsables de la qualité de l'adhérence. Les réparations visent le renforcement de la capacité structurale des ouvrages et donc à contribuer au prolongement de leur durabilité à long terme.

La réparation des structures dégradées ou des dalles de béton consiste ainsi à enlever le béton de recouvrement pour nettoyer ou remplacer les barres d'armature corrodées et appliquer un nouveau béton de recouvrement. La **Figure 1.2** présente l'anatomie d'une réparation : structure détériorée (gauche), en réparation (centre) et réparée (droite).

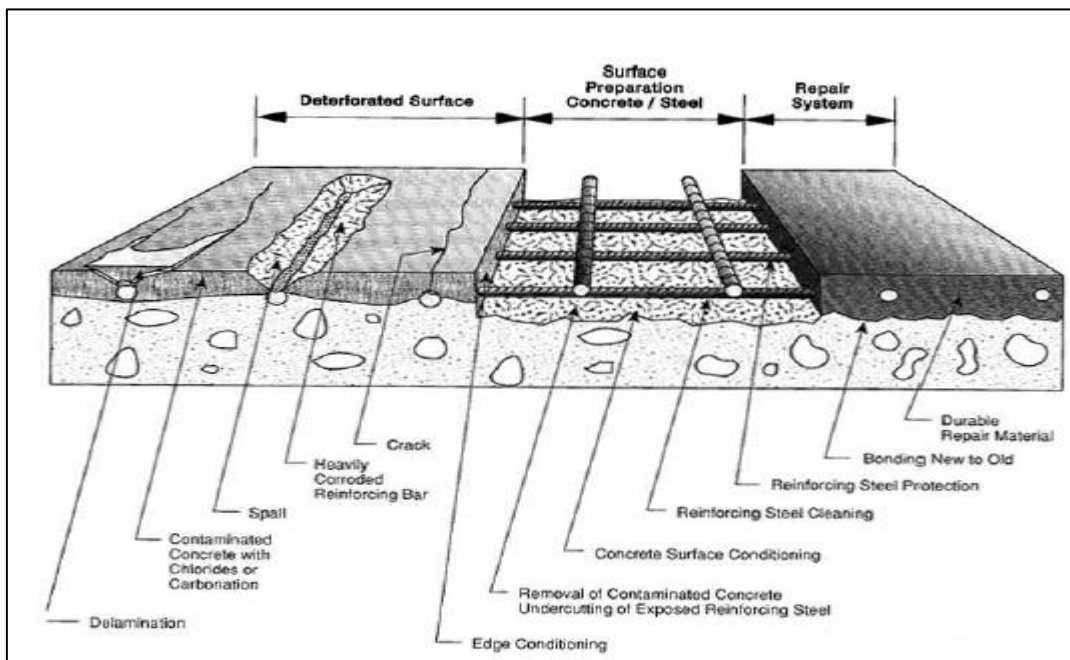


Figure 1.2 : Anatomie d'une réparation de surface [3].

Selon le degré de dégradation, on distingue :

- **Les réparations « profondes »** : Les réparations « profondes » ou les reconstructions partielles sont généralement effectuées pour rétablir l'intégrité structurale d'une structure ou d'une partie de structure. Dans ce type de réparations, les épaisseurs d'enrobage sont plus importantes de l'ordre supérieur à 5 cm [4]. La **Figure 1.3** présente un exemple de réparation profonde.

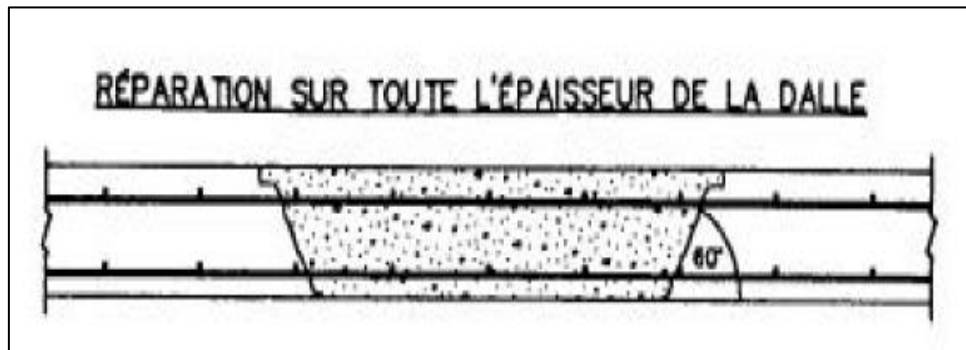


Figure 1.3 : Réparation sur toute l'épaisseur d'une dalle [49].

- **Les réparations « minces »** : Les réparations « minces » sont généralement réalisées pour protéger le béton ou l'acier d'armature contre les agressions du milieu extérieur. Plusieurs réparations minces sont aussi effectuées pour restaurer l'aspect esthétique de l'ouvrage. Les profondeurs de réparations sont souvent de l'ordre du recouvrement des barres d'armature c'est-à-dire à des profondeurs inférieures à 5 cm [4] (Figures 1.4, 1.5, 1.6, et 1.7).

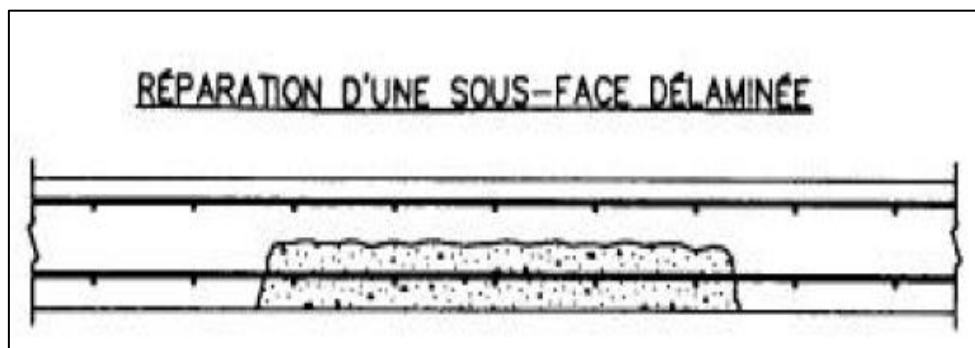


Figure 1.4 : Réparation d'une sous-face délaminée [49].

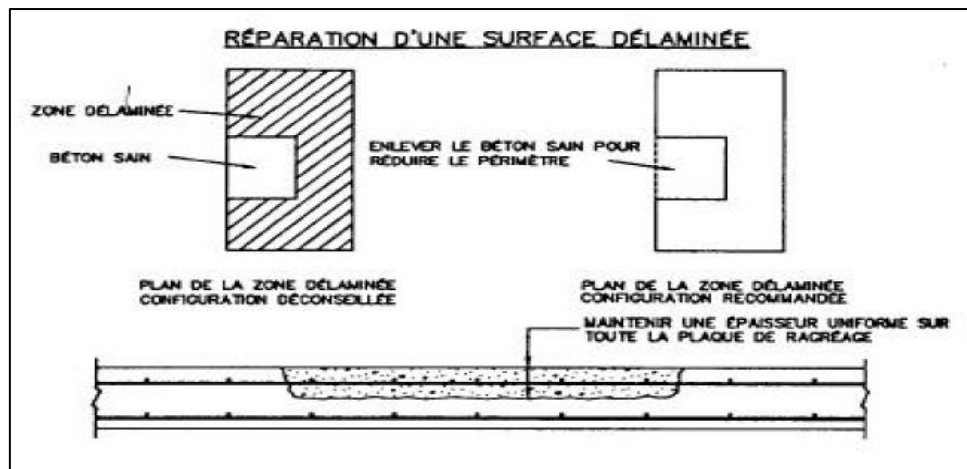


Figure 1.5 : Réparation d'une surface délaminée [49].

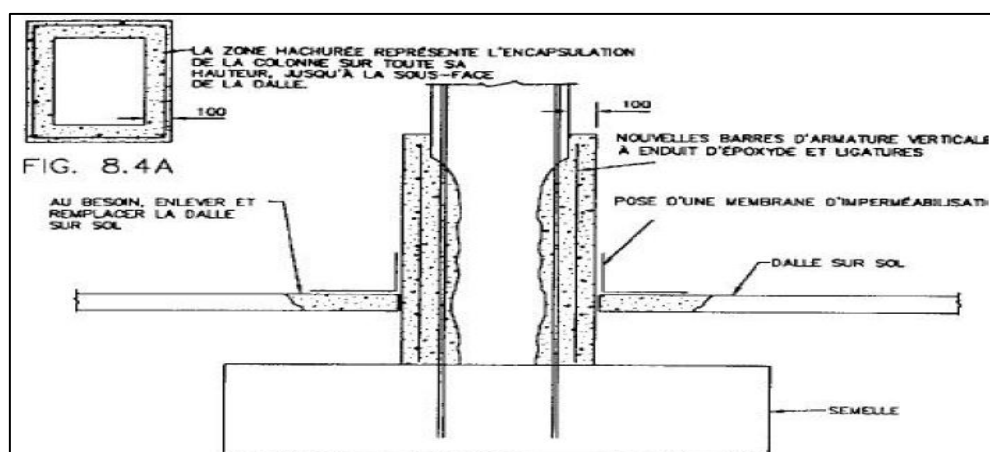


Figure 1.6 : Réparation d'une colonne délaminée [49].

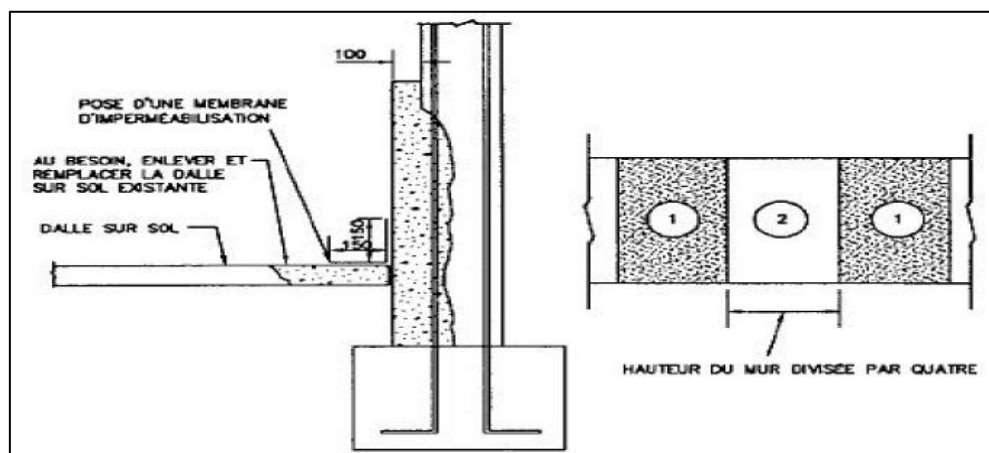


Figure 1.7 : Réparation d'un mur en béton délaminé [49].

La durabilité d'un « resurfaçage mince adhérent » dépend essentiellement de la qualité de l'adhérence entre le béton de réparation et le vieux béton. La qualité de l'interface peut être plus ou moins affectée par la présence des défauts d'interface multiples si le choix de matériaux de remplacement et les procédures de mise en place ne sont pas pris en compte.

Actuellement, l'évaluation de la performance des resurfaçages minces adhérents est généralement effectuée au moyen d'un essai d'arrachement (essai pull-off) pour mesurer la contrainte d'adhérence entre le béton de réparation et le béton original. Par ailleurs, cette méthode est ponctuelle, destructive et ne permet pas l'évaluation de grandes superficies de béton. Les erreurs d'interprétation des résultats sont souvent nombreuses.

La problématique de ce projet de recherche est axée sur la capacité de la méthode de la RI vibratoire aux basses fréquences à détecter et à caractériser la perte de l'adhérence entre deux bétons. L'étude portera principalement sur le cas d'un resurfaçage mince adhérent d'épaisseur généralement inférieure à 200 mm. Cette approche est souvent utilisée pour réparer les dalles de tabliers de ponts et les dalles structurales comportant des dégradations internes difficiles à détecter telles que :

- Les délaminages dus à la corrosion des barres d'armature ;
- Les décohésions d'épaisseur ou ouverture inférieure au millimètre ;
- Les fissurations parallèles au plan de décohésion ;
- Les fissures internes qui sont invisibles à l'extérieur de la structure et qui sont difficilement détectables et quantifiables.

### **1.3 Définition du sujet de recherche et objectifs**

Pour l'étude de l'évaluation de la qualité de l'adhérence entre deux bétons, il sera proposé d'explorer le potentiel en laboratoire et sur des ouvrages en service de quelques méthodes de contrôle non destructif (géoradar, thermographie infrarouge et méthodes acoustiques). L'étude sera toutefois focalisée sur la méthode non destructive basée sur la propagation des ondes acoustiques : la réponse impulsionnelle vibratoire aux basses fréquences.

En ce qui concerne la méthode de la RI, il faut savoir que la méthode a été développée dans les années 1960, à l'origine pour la caractérisation des structures en béton élancées (pieux, poutres, piles, etc.). Puis, avec les avancées techniques des dernières décennies la méthode a été utilisée pour détecter et détecter les défauts (vides, fissurations, délaminages, nids d'abeilles, etc.) dans les structures de béton de type plaque (dalles de tabliers de ponts ou chaussées, etc.).

Plusieurs travaux expérimentaux et scientifiques ont ainsi été développés. Les travaux ont montré la sensibilité de la méthode à détecter des défauts horizontaux dans une dalle, de taille supérieure à au moins deux fois l'épaisseur de la dalle. Les études ont montré qu'il est difficile avec la méthode de la RI de détecter des fissurations d'ouverture inférieure au micromètre. La méthode ne permet pas également d'estimer ou d'évaluer la profondeur d'un défaut.

De plus, l'analyse actuelle des données repose sur les principes empiriques prescrits dans la norme ASTM C1740. L'approche conventionnelle de traitement et d'analyse est basée sur le calcul des paramètres définis à partir de la courbe de mobilité spectrale, à savoir : la mobilité moyenne, le rapport entre le pic de mobilité maximale entre 0 et 100 Hz et la mobilité moyenne, la pente de mobilité et la rigidité dynamique. Cette démarche reste purement empirique. L'approche actuelle ne permet pas également de dissocier, dans une courbe de mobilité spectrale, les modes propres et les fréquences propres de résonance associés à la vibration d'un défaut à ceux associés à la vibration globale de la dalle. Ainsi, pour améliorer notre compréhension et approfondir les connaissances sur la détection et la caractérisation des défauts d'interface à l'origine de la perte d'adhérence dans les structures en réparation ou en service, un programme de recherche original et innovant basé sur la méthode vibratoire de la RI sera développé.

### **1.3.1 Objectif principal**

L'objectif principal de cette thèse vise à développer un outil de traitement et d'analyse fiable et efficace basé sur la méthode vibratoire de la RI pour la détection et la caractérisation de la perte de la qualité d'adhérence entre deux bétons. Le développement de l'approche de traitement des données de la RI sera basé sur l'étude modale et sur l'étude de la réponse forcée ou de la RI. Cette approche développée permettra de proposer, à partir des cartographies de modes propres

élaborées, l'évaluation des paramètres d'un défaut tels que la taille et la profondeur de décollement.

L'approche développée consistera à :

- **Implanter une approche d'analyse** à travers un programme informatique sur Matlab à partir des données issues de chaque point de mesure de la structure.
- **Définir** les paramètres d'analyse.
- **Exploiter le programme** pour séparer les **modes de vibrations globaux** (associés à la structure) des **modes locaux** (associés aux défauts) afin d'extraire les déformées modales associées aux modes de résonance du défaut.
- **Élaborer les cartographies.** Les résultats attendus sont **les cartographies de détection et d'estimation des paramètres des défauts** des modes et des fréquences propres.
- **Estimer les paramètres des défauts** (taille et profondeur). Les cartographies donnent des informations sur l'étendue des défauts. Connaissant la fréquence propre  $f_{ij}$  associée au premier mode de vibration des défauts, on sera en mesure d'estimer la profondeur  $e_{def}$  des défauts sous l'hypothèse de vibration en flexion de plaques minces :

$$f_{ij} = \frac{\lambda_{ij}^2}{2\pi A} \left[ \frac{E(e_{def})^3}{12\gamma(1-\nu^2)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

D'où :

$$e_{def} = \left( \frac{(2\pi)^2 12\gamma A^2 (1-\nu^2) f_{ij}^2}{\lambda_{ij}^4 E} \right)^{\frac{1}{3}}$$

On considèrera que les autres paramètres de la structure sont connus :

- Le module d'élasticité  $E$  ;

- La densité du béton  $\gamma$  ;
- Le coefficient de Poisson du béton  $\nu$ .

La surface du défaut  $A$  est directement déterminée sur la cartographie. Le paramètre  $\lambda_{ij}^2$  est un paramètre qui dépend des conditions limites. Une condition simplement supportée sera considérée pour l'estimation de la profondeur minimale alors qu'une condition encastree sera considérée pour l'estimation de la profondeur maximale.

### 1.3.2 Objectifs spécifiques

De l'objectif principal résultent les objectifs spécifiques. Pour d'atteindre l'objectif principal, il sera question de :

- **Définir** les paramètres d'évaluation (la taille, la profondeur, l'épaisseur du défaut) d'un système d'inspection acoustique de la perte de l'adhérence entre deux dalles de béton.
- **Réaliser** une étude modale et une étude de la RI à partir d'un programme numérique et d'un programme expérimental détaillé afin de valider et de séparer les modes et les fréquences propres associés à la vibration locale de ceux associés à la vibration globale.
- **Évaluer** les caractéristiques des défauts à l'origine de la perte de l'adhérence, à savoir : le diamètre ou la surface et la profondeur des défauts en utilisant les cartographies des modes propres et des fréquences propres.
- **Réaliser** une étude de la sensibilité des paramètres d'analyse définis de l'approche développée.
- **Réaliser** une étude de validation numérique et expérimentale de l'approche développée.
- **Valider** l'approche développée en sélectionnant un nombre limité des techniques d'inspection non destructives ou d'autres approches de traitement en l'occurrence les méthodes de détection par les ondes électromagnétiques (GPR, thermographie infrarouge), la méthode acoustique par transmission directe (essai sonique), l'approche conventionnelle de la RI et l'approche dite arithmétique de traitement des données de la RI proposée dans cette thèse.
- **Réaliser** une étude paramétrique détaillée afin de mieux comprendre et de vérifier les possibilités ainsi que les limites de l'approche développée et celles des méthodes non destructives sélectionnées pour la validation. Les quelques paramètres qui seront étudiés

sont ceux qui affectent le plus la réponse dynamique : le diamètre ou la surface du défaut, la profondeur du défaut, le délaminage dans les dalles armées, la position du défaut dans la dalle, la nature de la source de vibration, la gamme de fréquences de traitement des données.

- **Formuler des recommandations** sur l'utilisation des techniques d'inspection et sur l'approche de la RI développée pour l'évaluation de la qualité d'adhérence entre deux bétons.

## 1.4 Organisation de la thèse

L'étude comportera un volet de simulation numérique et un volet expérimental. Les simulations numériques et les expérimentations de laboratoire seront complétées par des expérimentations sur des ouvrages en service.

Ainsi, la thèse sera constituée, après le **chapitre 1** consacré à l'introduction générale, de deux principales parties :

- A. La première partie est consacrée à la revue bibliographique sur les systèmes de réparation et les différentes techniques d'auscultation des infrastructures en génie civil. Cette partie comporte quatre (4) chapitres :
  - **Le chapitre 2** : Ce chapitre porte sur la problématique des dégradations dans un système de réparation et leurs conséquences sur la qualité de l'adhérence entre deux bétons.
  - **Le chapitre 3** : Ce chapitre porte sur les techniques d'auscultation dites destructives ou semi-destructives et les techniques dites non destructives permettant notamment la détection et l'évaluation de la perte de l'adhérence.
  - **Le chapitre 4** : Ce chapitre porte sur l'application de la méthode de la RI à la détection des défauts et l'évaluation de la décohésion dans les structures en béton et dans les plaques minces.
  - **Le chapitre 5** : Ce chapitre est consacré à l'étude des propriétés physiques et mécaniques liée à la propagation des ondes acoustiques et les vibrations mécaniques des structures de type plaque.



**B.** La deuxième partie de cette thèse est consacrée à la méthodologie, à la description des programmes numérique et expérimental, et à la présentation des résultats.

En effet, pour mieux comprendre et analyser en détail les aspects et paramètres liés à la perte de l'adhérence dans les structures de béton, nous allons développer un programme de simulation numérique qui sera basé sur l'étude modale et sur l'étude de la réponse forcée par l'analyse par éléments finis. Un programme expérimental sera aussi effectué. Les deux programmes ainsi que quelques données issues des ouvrages ou des dalles expérimentales existantes permettront la validation de l'approche développée de traitement et d'analyse de la réponse impulsionnelle qui sera développée.

Le volet de simulation numérique permettra d'acquérir une meilleure connaissance sur la propagation des ondes acoustiques dans les dalles de béton armé ou non armé et comprendre la sensibilité des ondes acoustiques aux défauts d'interface. Plusieurs cas de simulations seront réalisés. Les données de simulation numérique seront transportées et traitées sur Matlab. La modélisation se fera en 2D ou 3D avec le logiciel **Comsol Multiphysics** basé sur la modélisation par éléments finis. La modélisation se fera en utilisant le module physique acoustique ou mécanique. Les résultats seront interprétés essentiellement dans le domaine fréquentiel.

Le volet expérimental consistera à définir et à réaliser un montage expérimental pour la validation (définir les paramètres du système d'acquisition, les processus de traitement et d'interprétation, les dimensions des dalles, les défauts ainsi que les propriétés des dalles). L'étude expérimentale sera effectuée sur des dalles de béton avec des resurfaçages minces caractérisées par des défauts (fissurations, vides et délaminage) de diamètre, d'épaisseur, de profondeur, de nature et de positions variables. Cette étude permettra de :

- Ajuster les paramètres d'acquisition de données (exemple : fréquence des ondes, type de signaux, distance émetteur-récepteur) ;
- Déterminer la sensibilité des techniques en fonction des caractéristiques des défauts d'interface ;
- Évaluer la validité des hypothèses posées sur le niveau d'homogénéité du milieu de propagation ;

- Étudier la performance et la fiabilité des techniques non destructives au niveau de la détection et la quantification des défauts d'interface.

La deuxième partie est constituée de sept (7) chapitres :

- **Le chapitre 6** : Ce chapitre porte sur description de l'approche développée d'analyse des données de la RI.
- **Le chapitre 7** : Ce chapitre porte sur la mise en œuvre du modèle de validation numérique de l'approche développée.
- **Le chapitre 8** : Ce chapitre sera consacré à la validation numérique et à l'étude critique de l'approche développée pour l'évaluation de la perte de l'adhérence en se basant sur une étude paramétrique détaillée.
- **Le chapitre 9** : Ce chapitre porte sur la mise en œuvre du modèle de validation expérimentale.
- **Le chapitre 10** : Ce chapitre porte sur la validation expérimentale de l'approche développée pour l'évaluation de la perte de l'adhérence en se basant sur l'approche numérique.
- **Le chapitre 11** : Ce chapitre porte sur la synthèse de travaux. Ce chapitre sera consacré à l'étude critique des techniques d'auscultation utilisées pour l'évaluation de la décohésion ainsi que sur les limites de l'approche développée en se basant sur l'étude paramétrique détaillée à partir des données expérimentales. Ce chapitre se penchera principalement sur la capacité de cette approche à déterminer les caractéristiques du défaut à savoir, le diamètre et la profondeur du défaut. Aussi, une étude de sensibilité sera réalisée. Il s'agira dans cette étude de déterminer les effets de tous les paramètres d'évaluation sur la réponse acoustique des structures.
- **Le chapitre 12** : C'est le chapitre consacré aux conclusions générales, aux recommandations et aux perspectives.

**PARTIE A : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE**  
**SYSTÈMES DE RÉPARATION - TECHNIQUES**  
**D'AUSCULTATION**

## **CHAPITRE 2**

# **PROBLÉMATIQUE DES DÉGRADATIONS DANS UN SYSTÈME DE RÉPARATION ET LEURS CONSÉQUENCES SUR LA QUALITÉ DE L'ADHÉRENCE ENTRE DEUX BÉTONS**

### **2.1 Introduction**

Un grand nombre des structures en béton construites dans les années de construction fastes qui ont suivi la Seconde Guerre mondiale nécessitent des réparations plus ou moins profondes pour continuer à maintenir leur capacité fonctionnelle.

En effet, les infrastructures en béton telles que les chaussées, les ponts, les tabliers de pont, les tunnels, les stationnements multi-étagés, les barrages, les voies ferrées, les cheminées, etc. sont sujets à de multiples processus de dégradations qui peuvent affecter gravement leur durabilité et leur intégrité structurale. Plusieurs facteurs sont à l'origine des dégradations : le climat et l'environnement, la conception de l'ouvrage, la mise en œuvre de l'ouvrage, les caractéristiques des matériaux et du béton, les sollicitations mécaniques et physico-chimiques et l'entretien des structures. Au Canada, et en particulier dans la province du Québec, les trois principales causes de dégradation sont les cycles de gel-dégel, la corrosion des barres d'armature et la réaction alcali-granulats.

Ces principaux mécanismes d'attaques affectent les propriétés mécaniques du béton, la résistance à la compression, la résistance à la traction, le module d'élasticité, le module de cisaillement, le coefficient de Poisson, etc.

La perte progressive de l'imperméabilité causée par une grande interconnexion des fissures et des pores et la réduction des propriétés mécaniques dégradent considérablement l'état de la structure du point de vue surfacique et volumique.

Les principales dégradations le béton ou dans l'acier d'armature sont liées à l'action de phénomènes tels que la carbonatation, la diffusion des ions chlore, la corrosion des barres d'armature, les attaques des sulfates, les attaques des acides, la réaction alcalis-granulats, les cycles de gel-dégel, l'abrasion, le mouillage-séchage, etc. (**Tableau 2.1**).

Tableau 2.1 : Principaux phénomènes à l'origine des dégradations dans le béton et dans l'acier d'armature (ENV 15049 :1997) [1.2].

Defects in concrete			Reinforcement corrosion		
Mechanical	Chemical	Physical	Carbonation and stray currents	Corrosive contaminants	
Impact	Alkali-Aggregate reaction	Freeze-thaw		At mixing	From the environment
Overload		Thermal		Sodium chloride	Sodium chloride
Movement (e.g. Settlement)	Aggressive Agents (e.g	Salt Crystallization		Calcium chloride	Other contaminants  Deicing salts
Vibration	Sulfates, salt, fresh water)	Shrinkage			Sea water
Explosion	Biological activities	Erosion			
		Wear			
		Fire			

Les réparations permettent prolonger la vie des infrastructures et de retarder leur détérioration. Les réparations ont souvent pour but de remplacer le béton détérioré par un nouveau béton adhérent et/ou ancré sur un substrat sain. Un système de réparation nécessite une phase d'analyse des causes des dégradations, une phase de préparation de la zone à réparer et une phase d'application du produit de réparation.

La durabilité des systèmes de réparation dépend des phénomènes physico-chimiques, des sollicitations mécaniques, des effets thermiques, des effets hydriques et des variations volumiques liées aux différents types de retraits. Tous ces facteurs peuvent être à l'origine de

multiples déformations empêchées qui peuvent affecter l'intégrité mécanique de la réparation en favorisant la fissuration et la perte d'adhérence entre les deux bétons.

## 2.2 Les mécanismes responsables de la perte de l'adhérence entre deux bétons

La problématique de l'adhérence dans les ouvrages du génie civil concerne aussi bien les systèmes nouvellement réparés que les « vieilles » infrastructures existantes. La présence des défauts, tels que les microfissurations, les fissurations, la présence de l'humidité dans les dalles, le délaminage du béton dû à la corrosion des barres d'armature et la perte de qualité du support sous les dalles de béton sont parmi les principaux facteurs qui contribuent à la perte de la capacité structurale des dalles de béton (**Figures 2.1 et 2.2**).

Ces mécanismes augmentent les contraintes sur la structure et par conséquent affectent les propriétés d'adhérence entre deux dalles.

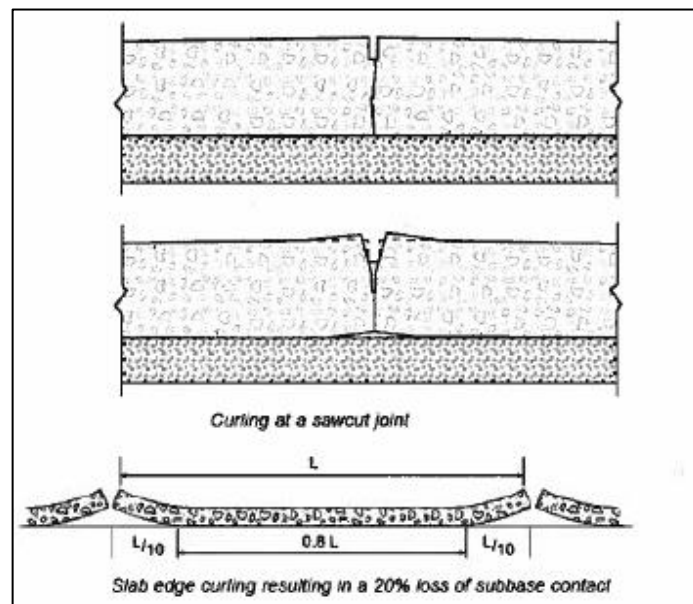


Figure 2.1 : La perte de contact entre la dalle et la fondation due au retrait différentiel [1, 7].

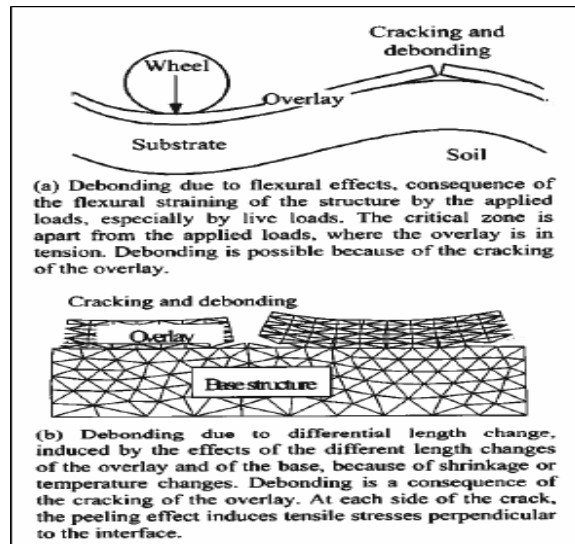


Figure 2.2 : Deux causes fondamentales de la perte d'adhérence : (a) due aux effets flexuraux, (b) due aux déformations différentielles [1,7].

L'adhérence caractérise le contact entre deux bétons. Elle assure la transmission des efforts entre les différents matériaux constituant la structure en béton. L'adhérence à l'interface entre deux bétons peut être classée en trois groupes [1, 8] (**Figure 2.3**) :

- L'adhérence parfaite ;
- L'adhérence incertaine ;
- Perte de l'adhérence ou décollement.

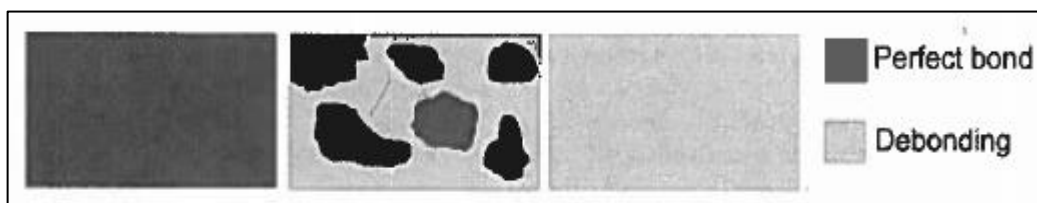


Figure 2.3 : Classification de l'adhérence en trois groupes : Adhérence parfaite (gauche), Adhérence incertaine (centre), Perte de l'adhérence ou décollement (droite) [1, 8].

La contrainte d'adhérence est généralement définie comme la résistance (ou force) à la traction perpendiculaire au plan de l'interface [1, 8]. La contrainte d'adhérence en cisaillement peut aussi être prise en compte. Les mécanismes d'adhésion sont principalement répartis en deux catégories, à savoir d'une part, l'adhésion mécanique associée au problème de rugosité

macroscopique et d'autre part, l'adhésion spécifique régie par les propriétés thermodynamiques, intermoléculaires et chimiques [1, 8] (Figure 2.4).

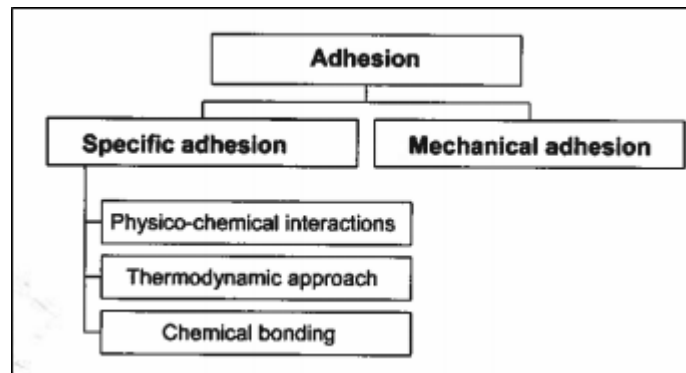


Figure 2.4 : Principes de la théorie d'adhérence [1, 8].

Ces mécanismes dépendent fortement de l'état de la surface de contact. Ainsi les mécanismes d'adhérence en tension diffèrent significativement de ceux en cisaillement. Par exemple, une interface assez rugueuse améliore généralement la résistance en cisaillement (Figure 2.5, droite) tandis que la résistance mécanique en traction va dépendre de l'ancrage vertical dans les pores et les vides (Figure 2.5, gauche) [1, 8].

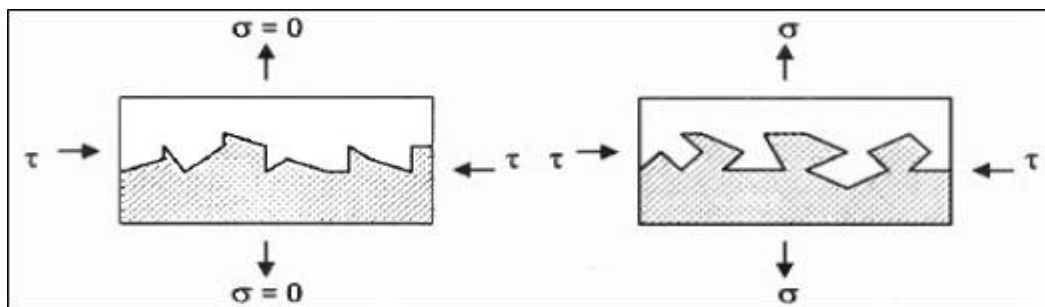


Figure 2.5 : L'adhérence mécanique en traction (gauche) et en cisaillement entre un substrat et un revêtement [1, 8].

Les principaux facteurs dont dépend la qualité d'adhérence sont les propriétés physico-chimiques de matériaux, la technique de démolition utilisée, les agents d'adhésion, les conditions de mise en place du béton, l'état de la surface de réparation, les vibrations dues au trafic, le murissement du béton, les facteurs dépendants du support, les paramètres dépendant de la couche de réparation et les conditions environnementales.



Ainsi, il est important de connaître ces facteurs qui peuvent affecter l'adhérence à court, à moyen ou à long terme afin d'éviter que des dégradations résultantes affectent l'intégrité des ouvrages.

### 2.2.1 Le choix et les propriétés des matériaux

La durabilité d'un système de réparation dépend du choix des matériaux. Plusieurs cas d'échecs de réparations découlent de l'utilisation des matériaux incompatibles avec le substrat ou avec les conditions d'exposition. La compatibilité résulte de l'équilibre entre les propriétés chimiques, physiques et électrochimiques du matériau de réparation et du substrat (**Figure 2.6**). Elle comporte plusieurs composantes dont : la compatibilité chimique, la compatibilité électrochimique, la compatibilité liée à la perméabilité et la compatibilité dimensionnelle.

La compatibilité dimensionnelle est un des paramètres les plus importants de la durabilité des réparations. Les propriétés du matériau qui peuvent influencer la compatibilité dimensionnelle sont : le retrait au séchage, le coefficient de dilatation thermique, le module d'élasticité et le fluage.

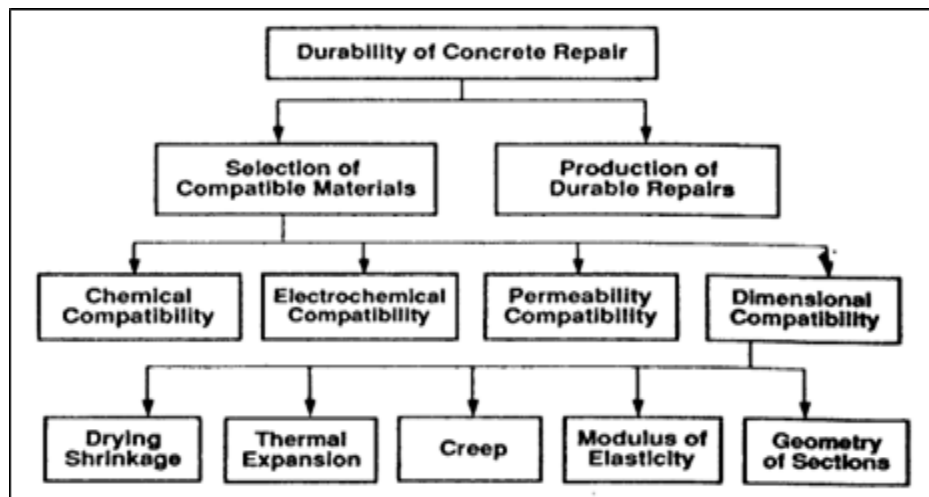


Figure 2.6 : Principaux facteurs contrôlant la durabilité des réparations [9].

Les différences entre les coefficients de dilatation thermique, les modules d'élasticité ou les coefficients de fluage entre le matériau de réparation et le substrat peuvent être à l'origine du développement des contraintes de cisaillement au niveau de l'interface. Ces contraintes peuvent

engendrer le décollement ou les fissurations dans la structure et donc entraîner la perte d'adhérence entre deux bétons (Figure 2.7).

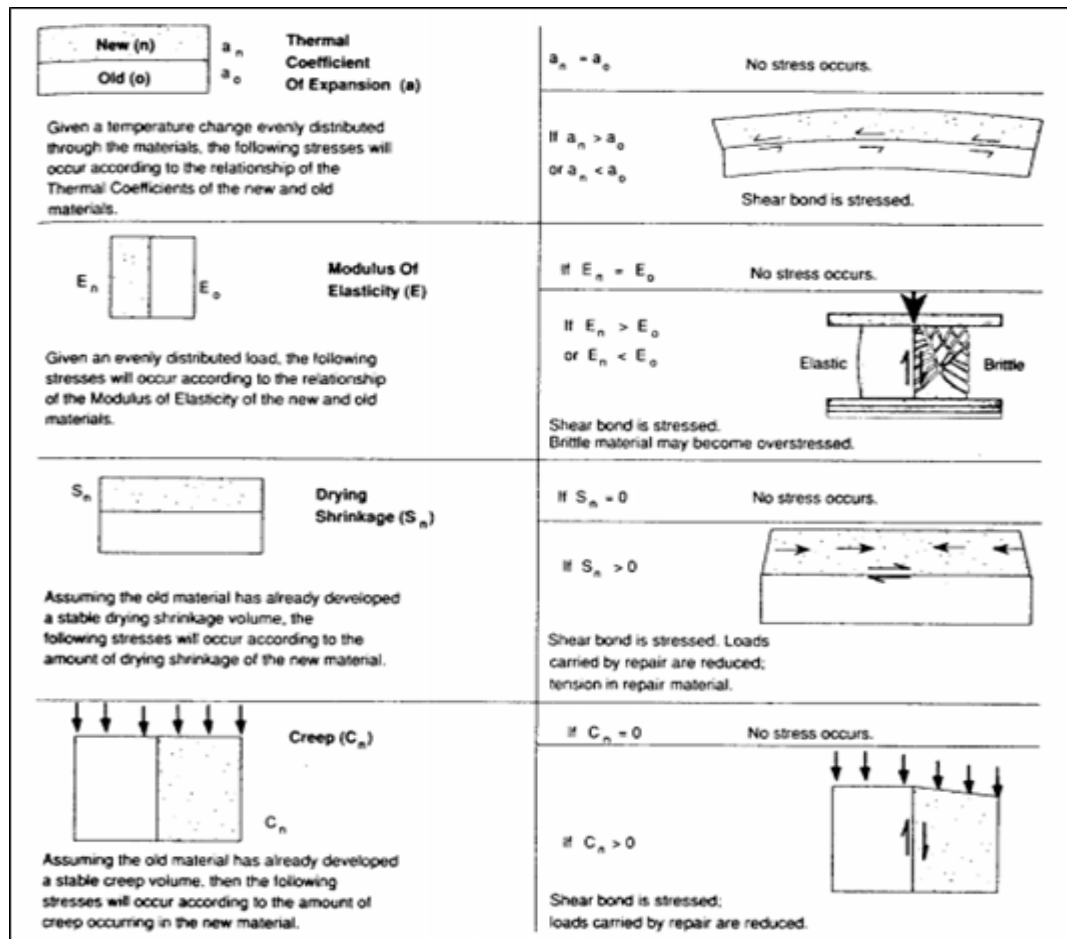


Figure 2.7 : Influence des changements volumétriques sur les réparations [9].

Parmi les facteurs de compatibilité, le retrait au séchage semble être le plus critique pour affecter la durabilité de l'adhérence dans un système de réparation. Le retrait de séchage correspond à une diminution du volume de la pâte provoquée par la diminution de la teneur en eau dans les pores. Il survient donc lorsqu'on abaisse le taux d'humidité interne du béton. Le processus de retrait empêché engendre des contraintes de traction dans la partie du béton exposée au séchage. Ces contraintes lorsqu'elles dépassent la résistance à la traction du matériau font apparaître des fissures dans la structure.

## 2.2.2 Les propriétés d'interface entre le béton de réparation et le substrat

Emmons et coll. (1994) décrivent un système de réparation formé par deux dalles, caractérisé par des propriétés différentes comme un système formé de trois phases (**Figure 2.8**) : le substrat ou béton d'origine, la zone de transition ou interface poreuse et le matériau de réparation ou nouveau béton. Ces trois phases sont essentielles pour le développement de l'adhérence.

Dans le cas d'un système de réparation, l'adhérence dépend de propriétés mécaniques (adhérence mécanique), physiques et chimiques (cohésion) des matériaux (nouveau béton et ancien béton) et surtout de la résistance de l'interface (**Figure 2.8**).

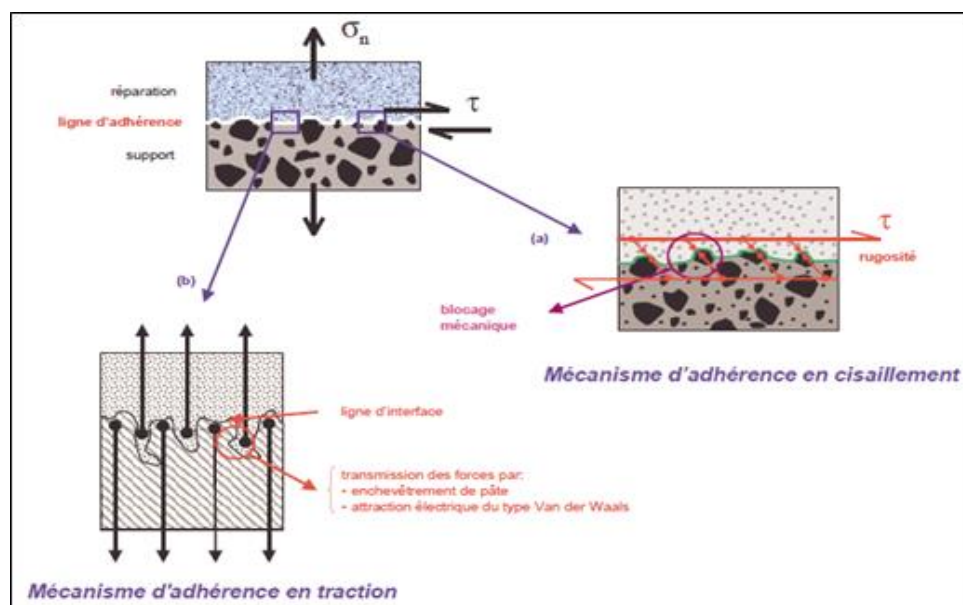


Figure 2.8 : Mécanismes d'adhérence [10].

La résistance de l'interface dépend largement des propriétés du substrat (la rugosité, l'intégrité du substrat, l'absorption capillaire, la teneur en eau, la cohésion superficielle, le module d'élasticité, etc.), mais également des propriétés des matériaux de réparation (le module d'élasticité, la nature du liant, la porosité, la maturation de la couche d'apport, etc.), de la préparation de la surface, des propriétés d'agent adhésif et des facteurs environnementaux tels que la température et le taux d'humidité de l'air (Emmons et coll. 1994). Une bonne préparation de la surface améliore la qualité d'adhérence entre deux bétons. La surface doit être non fissurée, exempte de poussières, d'huiles ou de graisses afin d'assurer une bonne adhérence entre les propriétés du béton de réparation et celles du vieux béton.

## 2.3 Propagation de la décohesion dans les structures en béton

Les principaux défauts à l'origine de la perte de la qualité de l'adhérence dans les dalles de chaussée en béton sont : les fissurations horizontales parallèles à l'axe des chaussées et les délaminages (**Tableau 2.2**). Ces défauts se développent généralement à l'intérieur des structures et sont donc inaccessibles lors des investigations visuelles préliminaires [1, 2].

Tableau 2.2 : Défauts associés aux dégradations des dalles de chaussée en béton (CRR 9991) [1,2].

Group	Type	Description
<b>Cracking</b>	Transverse crack	Rupture line perpendicular to the axis of the road
	Longitudinal crack	Rupture line parallel to the axis of the road
	Corner	Rupture line between transverse joint and longitudinal edge of the overlay
	Inclined crack	Short rupture line inside the slab and 45° inclination with road axis
	Alligator cracking	Mesh cracking
<b>Deformation</b>	Pumping (punch-out)	Water or sludge pumping in the joint when vehicles passage
	Stair steps (faulting)	Difference of level between the two edges of the joint or the crack
	Settlement	Settlement of the edges, after breaking up
<b>Spalling</b>	Pot-hole	Hole with rounded shape and affecting concrete layer continuity
	Scaling	Superficial desintegration of the concrete
<b>Joints distress</b>	Opening of longitudinal joint	Large and irreversible opening of the joint
	Degradation (spalling)	Explosion of the upper part of the overlay around the joint
	Loss of waterproofing properties	Cracking or debonding or pull-out of the sealing mass
	Creep of sealing mass	Overflowing of the sealing mass out of the joint

La taille de propagation et l'ouverture des défauts agissent beaucoup sur la perte de l'adhérence. En effet, lorsqu'une structure est soumise aux contraintes, les fissurations se peuvent se propager rapidement au niveau de l'interface entre deux bétons [1, 8].

Les **Figures 2.9** et **2.10** présentent les courbes d'ouverture des fissures en fonction de la taille de propagation des décollements dans les dalles de béton non armé, armé et renforcé aux fibres selon les différents travaux :

- D'après les travaux de Sabathier [8], la décohésion est initiée lorsque l'ouverture de la fissuration est comprise entre 0,05 mm et 0,2 mm, ce qui correspond à une longueur de décollement approximative de 80 mm. Au-delà de 0,2 mm d'ouverture, la décohésion devient problématique et donc la perte de l'adhérence entre deux bétons devient effective (**Figure 2.9**). L'intégrité de la structure est affectée.
- D'après les travaux de Farhat [8], la décohésion est initiée lorsque l'ouverture de décollement est inférieure à 0,01 mm. Elle est problématique ou effective lorsque l'ouverture est de 0,12 mm et correspond à une taille de propagation de 90 mm (**Figure 2.10**).

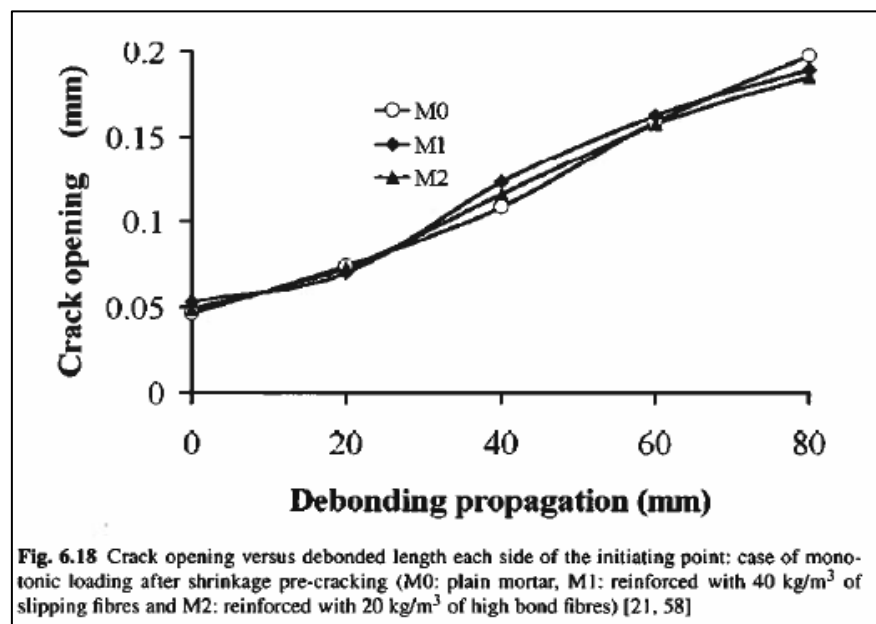


Figure 2.9 : Propagation du décollement en fonction de l'ouverture de la fissuration [8].

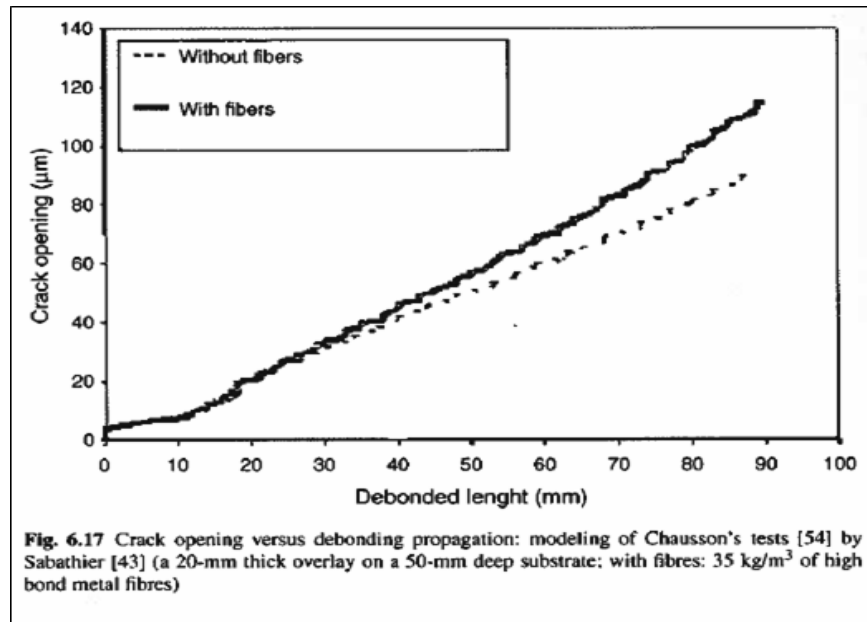


Figure 2.10 : Décollement en fonction de l'ouverture de la fissuration [8].

On voit que parmi les paramètres qui influent sur la qualité de l'adhérence, il y a la taille et l'ouverture de décollement.

## 2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types de dégradations des structures en béton et leurs conséquences sur la perte de la qualité de l'adhérence. Nous avons présenté les principaux mécanismes qui sont responsables de la perte de l'adhérence entre deux bétons dans les structures anciennes ou dans les systèmes de réparation : les microfissurations, les fissurations, les vides, la présence de l'humidité dans les dalles, le délaminage du béton dû à la corrosion des barres d'armature et la perte de qualité du support sous les dalles de béton. Ces mécanismes affectent les propriétés de l'adhérence (les contraintes mécaniques en traction et en cisaillement) entre deux bétons et peuvent être préjudiciables à l'intégrité de la structure si ceux-ci ne sont pas rapidement détectés et détectés.

## **CHAPITRE 3**

# **AUSCULTATION DES INFRASTRUCTURES DE GÉNIE CIVIL ET ÉVALUATION DE LA PERTE DE L'ADHÉRENCE**

### **3.1 Introduction**

La connaissance et l'analyse des causes associées aux nombreuses dégradations sont les premières étapes à connaître avant d'entreprendre des travaux de réparation sur des structures en béton existantes. Il s'agit donc de faire intervenir les techniques d'auscultation.

L'auscultation des ouvrages de génie civil se définit comme un ensemble de techniques et procédés d'examens basé sur la mesure et l'interprétation de phénomènes physiques en vue d'établir un diagnostic sur leur comportement permettant ainsi de fournir un pronostic sur leur durabilité.

Dans les structures neuves et anciennes, l'auscultation permet de vérifier, d'estimer ou de contrôler les caractéristiques telles que la qualité d'adhérence entre deux matériaux, l'épaisseur des structures, la densité du béton, le renfort, les vides, les fissures et microfissures, l'enrobage des barres d'armature, la nature des barres d'armature, l'espacement des barres d'armature, le diamètre des barres d'armature. Dans des ouvrages supposés endommagés, les techniques d'auscultation permettent de détecter l'extension d'endommagement.

L'évaluation est effectuée au moyen des techniques expérimentales élaborées en laboratoire, au moyen des techniques dites destructives, semi-destructives et de contrôle non destructif (CND). Ces méthodes permettent de détecter les changements des propriétés physiques, chimiques et mécaniques du béton : la fissuration, la déformation, l'écaillage, la carbonatation, la détérioration des joints, etc., dans les structures telles que les dalles de tabliers de pont ou les

dalles des chaussées. Ces défauts variés représentent des signes avant-coureurs avec des conséquences souvent irréversibles sur la durabilité de la structure.

### **3.2 Auscultation des structures par des techniques dites conventionnelles, destructives et semi-destructives**

Les techniques conventionnelles, ce sont des techniques qui peuvent être destructives ou semi-destructives. Elles sont basées sur des mesures physiques, chimiques et mécaniques pouvant entraîner des endommagements (impacts, trous, etc.) sur les structures auscultées.

L'objectif des essais est de mesurer les propriétés chimiques, physiques et mécaniques des matériaux, telles que :

- La mesure de la résistance à la traction, qui donne des informations sur la capacité d'un béton à résister à la fissuration ;
- La mesure de l'adhérence entre deux bétons par des essais de traction ;
- La mesure des modules d'élasticité : le module dynamique ou module de Young et le coefficient de Poisson qui renseignent sur la rigidité des matériaux ;
- La mesure de la perméabilité du béton à l'eau ou au gaz, pour connaître l'état d'infiltration des fluides dans les matériaux ;
- La détermination de la masse volumique apparente et de la porosité du béton ;
- La mesure de la résistance au gel-dégel ;
- La mesure de la profondeur de pénétration des ions chlorure, pour avoir des renseignements sur la probabilité de corrosion des barres d'armature ;
- La mesure du taux d'oxygène et de dioxyde de carbone dans les matériaux.

Certaines propriétés mesurées dans bien des cas sont corrélées à la résistance à la compression ou à la résistance à la traction du matériau. La résistance à la compression est de loin la propriété physique la plus mesurée pour caractériser la résistance des matériaux.



### 3.2.1 Les principales méthodes d'évaluation destructives et semi-destructives

Les principales méthodes conventionnelles les plus utilisées dans l'auscultation des structures en béton en génie civil sont les essais : pull-off, pull-out et de rupture.

- **L'essai pull-off** : La technique permet de déterminer la résistance en traction de la structure à contrôler en exerçant un effort de tension sur une pastille métallique fixée sur cette structure. Elle permet d'évaluer l'adhérence en traction des systèmes de réparations ainsi que celle d'un béton superficiel non réparé. Elle est appliquée selon les normes standards canadienne (CSA A23.2 – 6B), américaine (ASTM C1583) et européenne *ENI 1504-3 Products and Systems for Protection and Repair of Concrete Structures – Part 3 : Structural and Non-Structural Repairs* [11].
- **L'essai pull-out** : La technique permet de déterminer la résistance à l'extraction dans le béton (durci) d'un ancrage inséré dans le béton frais ou durci. Le résultat de la mesure est corrélé à la résistance à la compression à partir des données de calibration obtenues expérimentalement. L'essai donne des informations sur la qualité du béton. Cependant, les mesures sont ponctuelles et destructives. La méthode est appliquée selon la norme *ASTM C900 Standard Test Method for Pullout Strength of Hardened Concrete* [12].
- **Essai de rupture ou Break-off Test** : Méthode peu répandue. Le principe de l'essai permet de mesurer la force de rupture d'un échantillon cylindrique de béton dans une structure nouvelle ou ancienne. Le résultat de la mesure est ainsi corrélé à la résistance à la compression. La méthode est visée par la norme *ASTM C1150 Standard Test Method for the Break-Off Number of Concrete* [15].

### 3.2.2 Évaluation de l'adhérence par les techniques mécaniques

Plusieurs méthodes ont été développées pour l'évaluation de force d'adhérence entre deux matériaux. L'évaluation des propriétés d'adhérence entre deux bétons se fait au laboratoire à partir de la corrélation de mesures sur les échantillons de la résistance à la compression, à la

traction ou à la torsion. Sur le terrain, les mesures de résistances à la compression, à la traction ou à la torsion se font au moyen des techniques souvent destructives ou semi-destructives.

Les méthodes mesurent donc la force de résistance à la traction (**Figures 3.1 A, B**), la force de résistance au cisaillement ou à la torsion (**Figures 3.1 C, D, E, F, G, H, J, K, L, M, N, O**) [1, 8].

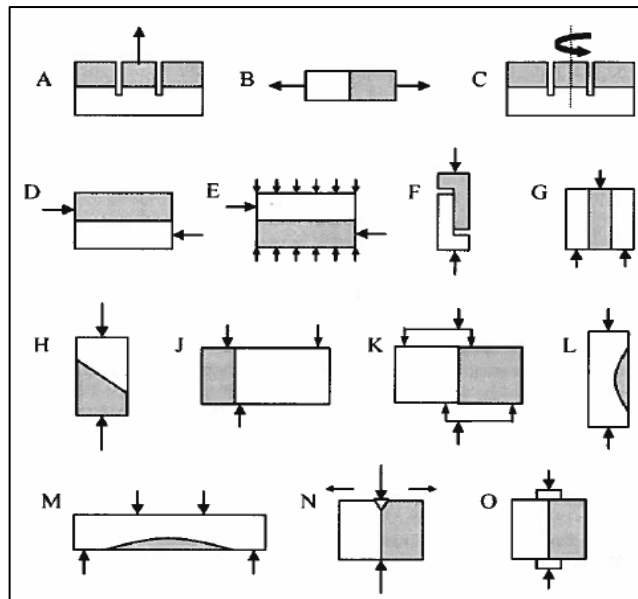


Figure 3.1 : Méthodes d'évaluation de l'adhérence entre deux matériaux [1, 8].

La technique de Pull-Off est la méthode la plus utilisée notamment sur le terrain. Les autres méthodes restent plus des méthodes appliquées aux essais de laboratoire.

### ➤ Méthode de Pull-Off

La technique de Pull-off est généralement la méthode la plus utilisée pour l'évaluation de la qualité d'adhérence entre deux matériaux. Elle permet de donner des renseignements sur la :

- Résistance à la traction du substrat ;
- Résistance au décollement d'un système de réparation ou d'une couche de béton reposant sur un substrat ;
- Résistance à la traction d'un matériau de réparation ou un adhésif utilisé dans la réparation après que le matériau ait été appliqué à une surface et d'identifier le mode de rupture [16].

Le principe est basé sur la détermination de la force maximum d'arrachement d'une plaque métallique en acier (pastille métallique de 50 mm de diamètre) d'essai collée au moyen d'une résine d'époxy sur la surface de la structure à ausculter perpendiculairement à la surface de l'appareil de mesure (**Figure 3.2**). La zone d'essai est isolée du reste de la surface par un carottage traversant la couche supérieure et pénétrant dans le substrat d'au moins 10 mm de profondeur en dessous de l'interface nouveau béton/vieux béton.

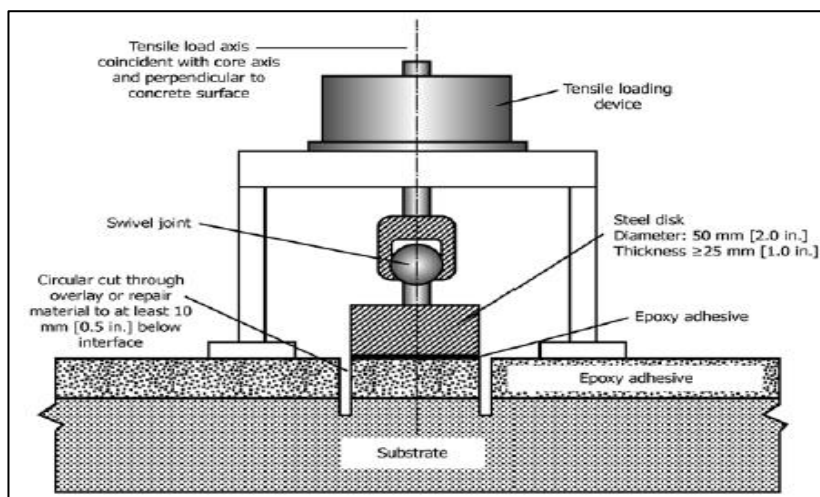


Figure 3.2 : Essai pull-off – Principe [16].

Les résultats obtenus donnent des renseignements sur la contrainte de rupture et le mode de rupture. On distingue différents modes de rupture :

- Ruptures cohésives : Ce sont des ruptures qui peuvent se développer dans le béton de réparation (**Figure 3.3 c**), ou dans le substrat (**Figure 3.3 a**) ;
- Ruptures adhésives : Les ruptures peuvent se produire à l'interface entre le béton de réparation et le substrat. Si aucune rupture ne produit dans ce cas, le système de réparation est caractérisé par une forte adhérence (**Figure 3.3 b**).

La force de liaison ou de l'adhérence est évaluée lorsque la rupture a lieu à l'interface entre le béton de réparation et le vieux béton (**Figure 3.3 b**). La force de traction est mesurée lorsque la rupture a lieu soit dans le béton de réparation ou dans le substrat (**Figures 3.3 a et 3.3 c**). La force d'adhérence à l'interface serait ainsi élevée dans le cas des **Figures 3.3 a et 3.3 c** puisque la rupture ne se produit pas à l'interface de deux bétons. À partir des courbes de calibration obtenues expérimentalement connaissant la force d'arrachement, on peut également déduire la résistance à la traction ou encore la force de l'adhérence.

Bien que la technique soit intéressante pour l'évaluation de la qualité d'adhérence, elle reste destructive, car elle affecte l'intégrité de la structure mesurée [17].

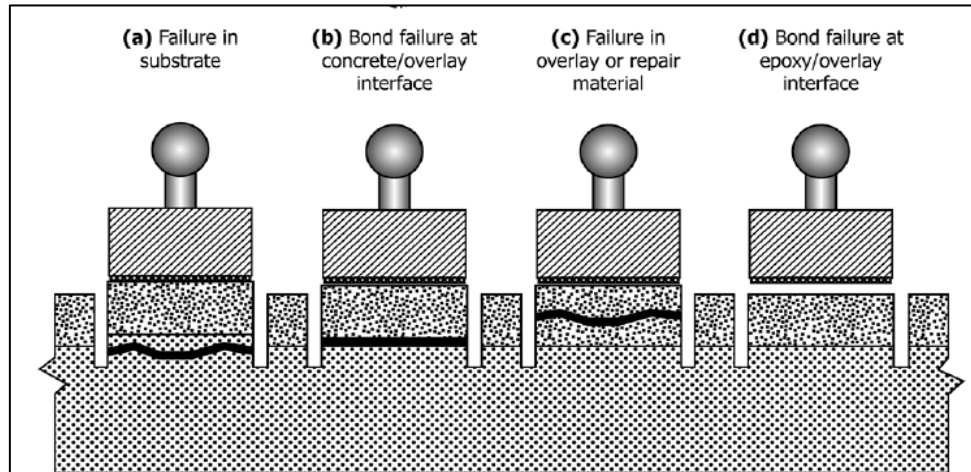


Figure 3.3 : Essai Pull-Off - Différents modes de rupture [16].

### 3.2.3 Conclusion

Ces méthodes sont intéressantes du point de vue de la reproductibilité des mesures sur le terrain. Leur précision reste néanmoins très limitée du fait qu'elles sont ponctuelles et locales. Les mesures sont souvent limitées sur des petites surfaces et ne traduisent donc pas l'état réel de l'ensemble de la structure. La probabilité de commettre des erreurs d'interprétations peut être grande. Ces techniques sont destructives ou semi-destructives pour la plupart d'entre elles puisque l'intégrité de la structure auscultée est affectée. Du fait des inconvénients qu'elles présentent, les ingénieurs s'intéressent de plus en plus aux techniques dites non destructives capables d'ausculter sur de larges étendues de surface et sans causer des dégradations de la structure lors des mesures.

## 3.3 Auscultation des structures par les techniques dites de contrôle non destructif (CND)

Longtemps, les techniques destructives et semi-destructives ont été utilisées pour la détection des défauts dans les ouvrages en béton. Ces techniques sont de plus en plus délaissées au profit des techniques dites de contrôle non destructif.

L'utilisation croissante de ces dernières dans l'auscultation des structures en béton est due à plusieurs facteurs [18] :

- Le développement technologique des logiciels d'acquisition, de traitement et d'analyse des données ;
- Les avantages économiques dans l'évaluation de grands volumes et surfaces de béton par rapport aux techniques de carottage ;
- La capacité de réaliser des évaluations de façon simple et rapide ;
- La spécification des méthodes d'essais non destructives pour l'évaluation de la qualité de fondations profondes et du béton de réparation.

Les matériaux sont peu ou pas affectés par les mesures. Les essais reposent essentiellement sur l'inspection visuelle ou sur les méthodes basées sur l'analyse et l'interprétation de la réponse d'un matériau suite à une excitation mécanique, électrique, thermique, électromagnétique ou magnétique. Les techniques non destructives sont appliquées aux infrastructures en béton pour au moins quatre raisons principales [18] :

- Le contrôle de la qualité des nouvelles constructions ;
- Le diagnostic des anomalies ou défauts dans les nouvelles constructions ;
- L'évaluation de l'état des bétons anciens susceptibles d'être réparés ;
- L'évaluation de la qualité du travail de réparation.

Les techniques non destructives sont plus avantageuses, car elles peuvent donner accès à des informations, sur :

- La détection et l'évaluation des fuites ;
- La détection et l'évaluation des défauts dans la dalle de béton (les fissurations, les délaminages, les décollements, le degré de consolidation, la présence des vides et des nids d'abeille) ;
- La détection et la localisation des barres d'armature, leur taille, leur espacement ainsi que la détection de leur état de corrosion ;
- La métrologie et l'évaluation des tailles des défauts ;

- L'estimation des propriétés mécaniques et physiques (les constantes d'élasticité, la densité, la vitesse des ondes dans les matériaux) ;
- La détermination des propriétés physico-chimiques (la résistivité et la conductivité des matériaux, les taux d'humidité et des ions chlorures, etc.).

Ces méthodes sont largement utilisées dans les domaines tels que le génie mécanique (aéronautique), la métallurgie, la médecine et les sciences de la Terre.

### 3.3.1 Les principales méthodes d'évaluation non-destructive

#### 3.3.1.1 Inspection visuelle et le sondage au marteau

Les inspections visuelles et le sondage au marteau constituent les premières étapes de l'évaluation d'une structure en béton :

- **Le sondage au marteau** est utilisé pour délimiter les zones problématiques suivant le son fourni par le marteau au contact avec la structure à ausculter. Ainsi, un son grave ou creux donne des informations sur un béton dégradé tandis qu'un son aigu sur un béton sain ou non dégradé. Cependant, cette méthode est subjective. Le résultat de l'essai peut être sous-estimé ou surestimé, car l'interprétation du son dépend des capacités auditives de l'opérateur à différencier un son aigu d'un son creux.
- **L'inspection visuelle** recommande d'avoir des connaissances approfondies sur l'ingénierie structurale, les matériaux cimentaires et les méthodes de construction pour être capables d'extraire une quantité d'information suffisante. L'inspection repose sur la détection et l'évaluation des signes extérieurs de détérioration des infrastructures, ce qui permettra par la suite d'élaborer une liste de recommandations sur l'état de la structure basée sur une classification selon le degré de dégradation. Les défauts évalués sont généralement les fissures et microfissures, le délaminage du béton, les défauts de surface (écaillage, efflorescence), les signes de corrosion des barres d'armature, l'éclatement du béton, les fuites d'eau, les nids de cailloux, les dépôts, les cratères, les désagréments, les signes de détériorations chimiques liées aux attaques d'acides ou des sulfates, les déviations et les déformations visibles, le soulèvement et le tassement.

Il existe des guides ou documents (ACI 201.1R, ACI 207.3R, ACI 224.1R, ACI 362R) qui donnent des informations pour la reconnaissance et la classification de différents types de dommages et pour évaluer les causes de ces dégradations. L'inspection visuelle reste néanmoins une procédure d'auscultation limitée, car la probabilité de détection des défauts, surtout ceux situés à l'intérieur de la structure ou entre deux dalles de béton, est faible pour juger de l'état réel de la structure ou détecter des dégradations liées par exemple à la perte de l'adhérence. Comme dans le cas des techniques conventionnelles, les décisions prises lors de l'inspection visuelle peuvent conduire à une surestimation ou à une sous-estimation du degré de dégradation et engendrer des conséquences financières pénalisantes. L'utilisation des méthodes non destructives est plus que nécessaire dans la mesure où l'évaluation peut être plus détaillée que celle fournie par les méthodes destructives et ponctuelles.

### 3.3.1.2 Méthodes d'estimation de la résistance à la compression

Les méthodes les plus utilisées sont :

- **L'essai au marteau de Schmidt** : Connue sous le nom marteau de Schmidt ou encore d'essai au scléromètre, la méthode permet de mesurer la dureté superficielle du béton. Un marteau en acier propulsé par un ressort projette une tige de rigide au contact de la surface du béton mesurée. Le résultat de l'essai est exprimé par rapport à l'intensité du rebond du marteau mesuré sur une échelle arbitraire allant de 0 à 100. L'intensité du rebond est ensuite corrélée à la résistance à la compression du béton en utilisant les différentes courbes de calibrations théoriques. C'est la technique la plus répandue pour l'estimation in situ de la résistance à la compression des matériaux à cause de sa simplicité d'utilisation et son coût très faible. La méthode est visée par la norme *ASTM C805 Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete* [13].
- **L'essai de la résistance à la pénétration (sonde Windsor)** : La technique connue aussi sous le nom de *Probe Penetration Test* repose sur la mesure de la résistance à la compression du béton. En effet, une tige d'acier est projetée sur le béton de la structure à contrôler par un pistolet muni d'une charge explosive. La mesure de la longueur de la tige ayant pénétré dans le béton est corrélée à la résistance à la compression en se servant

des courbes de calibration. La technique donne des informations sur la qualité du béton. Cependant les granulats et leur distribution, la carbonatation du béton, l'âge du béton peuvent avoir un effet important sur les résultats. Aussi les mesures peuvent endommager la structure auscultée. La méthode est liée à la norme *ASTM C803 Standard Test Method for Penetration Resistance of Hardened Concrete* [14].

### 3.3.1.3 Les techniques de contrôle non destructif basées sur l'interprétation des phénomènes physiques

Les méthodes non destructives utilisent les propriétés physiques pour évaluer et comprendre l'état des matériaux. Les matériaux auscultés sont excités soit mécaniquement, électriquement, thermiquement ou magnétiquement. La réponse de cette excitation renseigne sur les propriétés des matériaux. Selon les phénomènes physiques à la base de ces techniques, on distingue les techniques électromagnétiques, les techniques de potentiel et les techniques acoustiques.

- **Les techniques électromagnétiques** : Ces méthodes sont basées sur l'interprétation du signal issu de la propagation des ondes électromagnétiques dans les matériaux. Parmi les techniques électromagnétiques :
- **La technique géoradar ou *Ground Penetrating Radar* (GPR)** : Dans cette méthode, les ondes électromagnétiques générées à l'aide d'une antenne émettrice se propagent à travers le matériau et lorsqu'elles rencontrent une interface entre deux matériaux aux propriétés physico-chimiques ou mécaniques différentes, une partie de l'énergie est réfléchiée vers la surface et est enregistrée au moyen d'une antenne réceptrice. L'autre partie de l'énergie est transmise vers les couches les plus profondes de la structure. Les réflexions enregistrées sont ensuite traitées, analysées puis représentées sous forme de profils cartographiques sur lesquels on peut voir la position des barres d'armature sous les dalles armées, la détection et la caractérisation des défauts dans le béton (les vides, les fissurations, les délaminages). La technique est également utilisée pour l'estimation de la probabilité de corrosion des barres d'armature. Elle est visée par la norme *ASTM D4748 Standard Test Method for Determining the Thickness of Bound Pavement Layers using Short-Pulse Radar* [19].



- **La technique de thermographie par infrarouge** : C'est une technique qui permet de détecter les défauts proches de la surface par la mesure la température de la surface de la structure. La présence d'une anomalie ayant une conductivité thermique plus faible que celle des matériaux environnants interférera avec un courant de chaleur et modifiera la distribution de la température de la surface. Ainsi l'énergie à la surface de la structure ne sera plus répartie de façon uniforme du fait de la présence des défauts [1, 5]. La technique détecte ainsi les vides, les fissurations, les zones de décollement, les délaminages du béton sous les dalles et dresse une représentation bidimensionnelle de la température de la zone auscultée au moyen d'une caméra à infrarouge. Elle est visée par la norme *ASTM D4788 Standard Test Method for Detecting Delamination in Bridges Using Infrared Thermography* [20].
  
- **Les méthodes nucléaires** : Ces méthodes utilisent des rayonnements électromagnétiques pour détecter les défauts et les barres d'armature dans les structures. Il s'agit principalement des méthodes radiométriques et les méthodes radiographiques. Ces méthodes, à cause de leur forte radioactivité, nécessitent des précautions drastiques et un personnel bien expérimenté. Elles sont visées par la norme *ASTM C1040 Standard Test Method for Density of Unhardened and Hardened Concrete in place by Nuclear Methods* [21].
  
- **Les techniques électrochimiques** : Elles déterminent les propriétés électriques des matériaux (mesure du potentiel électrique, du courant électrique, de la conductivité ou de la résistivité des matériaux). Les méthodes électrochimiques les plus utilisées sont :
  - **La méthode de potentiel de corrosion** : Elle est utilisée pour l'évaluation de la probabilité de corrosion des barres d'armature. La méthode consiste à mesurer la différence de potentiel entre une électrode fixée sur la barre d'armature et une électrode de référence positionnée sur un point de mesure de la structure. Selon la norme *ASTM C876 Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete* [22], lorsque le potentiel mesuré est supérieur à -200 mV, la probabilité de corrosion est de 10 % et la corrosion est faible. Lorsque le potentiel est compris entre -

200 mV et -350 mV, la probabilité de potentiel est de 50 % et la corrosion est initiée. Lorsque le potentiel est inférieur à -350 mV, la probabilité de corrosion est de l'ordre de 90 % et donc la corrosion est à un stade avancé.

- **La méthode de résistivité électrique** : La résistivité est une propriété qui est intrinsèque au matériau ausculté. Elle dépend de la composition de la solution contenue dans les pores, de la structure des pores, de la teneur en eau, de l'âge du béton, de la température du béton. La méthode est donc utilisée pour l'évaluation des zones humides, poreuses et l'état de corrosion des barres d'armature.
- **Les techniques acoustiques** : Elles reposent sur l'interprétation de la propagation des ondes élastiques se propageant à travers les matériaux. Les ondes élastiques ou mécaniques sont sensibles aux propriétés mécaniques du béton : le module d'élasticité, le coefficient de Poisson, la densité, les vitesses de propagation dans le milieu. Parmi les méthodes acoustiques, on distingue les méthodes de basses fréquences et les méthodes de hautes fréquences.
- **Méthodes acoustiques de basses fréquences** : La propagation des ondes est générée par une vibration ou une perturbation mécanique sur la surface de la structure auscultée. De cette vibration mécanique résulte une déformation locale du milieu. Les sources d'impact ou d'émission sont de nature diverse. Elles sont choisies en fonction de la taille et la nature des structures à ausculter. Parmi les sources plus couramment utilisées, on peut citer les marteaux d'acier de 250 g (fréquence de 5 kHz) ou de 1 à 5 kg (fréquence entre 1 et 5 kHz), les marteaux munis d'un capteur de force, les billes d'acier (fréquences de 10 à 60 kHz). Les capteurs de détection de ces ondes peuvent être des géophones sensibles à la vitesse de vibration des particules, des accéléromètres sensibles à l'accélération de vibration des particules, des capteurs de déplacements sensibles aux déplacements des particules. Les techniques soniques les plus couramment employées pour la détection des défauts (vides, nid-abeilles, délaminage, fissurations) sous les dalles de béton sont :

- **La technique de la réponse impulsionnelle** : La technique permet de déterminer la réponse de l'élément contrôlé. L'analyse de la réponse donne des informations sur la présence des vides, des nids d'abeille, des délaminages sous les dalles. C'est une méthode potentiellement porteuse pour l'évaluation de l'adhérence entre deux bétons. Elle est visée par la norme *ASTM C1740 (10), Standard Practice for Evaluating the Condition of Concrete Plates Using the Impulse-Response* [23].
  
- **L'essai de résonance** : La technique permet de déterminer les propriétés dynamiques (modules d'élasticité) des matériaux à partir de la mesure de la fréquence de vibration d'un matériau. En effet lorsqu'un impact mécanique est appliqué à la surface d'un matériau, ce dernier entre en vibration (vibration longitudinale, transversale et de torsion). La fréquence de vibration du matériau est fonction de ses propriétés d'élasticité (état d'intégrité) et de sa géométrie. La technique est utilisée pour évaluer les dégradations du béton et donc la condition des structures. Elle est visée par la norme *ASTM C215, Standard Test Method for Fundamental, Transverse, Longitudinal and Torsional Frequencies of Concrete Specimens*.
  
- **La sismique par réflexion** : C'est une méthode utilisée dans le domaine de la géophysique pétrolière et minière, et dans le domaine de la géotechnique pour la caractérisation des sols. Le principe de la technique est basé sur l'interprétation des ondes réfléchies. De ces ondes, on détermine la profondeur des différentes couches dans le milieu.
  
- **Méthodes acoustiques de hautes fréquences** : Dans les méthodes de hautes fréquences, les ondes sont générées au moyen des sources d'émission de hautes fréquences ou au moyen des transducteurs piézoélectriques qui génèrent des vibrations mécaniques dans le matériau. Ces transducteurs piézoélectriques constitués d'une pastille piézoélectrique qui peut se déformer en présence d'une tension électrique et convertit le signal électrique en un signal mécanique ou inversement. Le dispositif de mesure est composé soit d'une ou plusieurs paires de transducteurs identiques de même fréquence centrale pour générer

et pour recevoir les ondes soit d'un capteur jouant à la fois le rôle de transmetteur et de receveur.

Les transducteurs peuvent être directement mis au contact avec le matériau de mesure grâce à l'application d'un couplant (gel, miel, vaseline, etc.) permettant d'éviter la perte d'énergie. Le couplant peut induire de l'atténuation et le changement manuel de la position du récepteur implique le bruit causé par la non-répétitivité de couplage et par l'erreur de son positionnement. Pour remédier à ce problème, on adopte une procédure de mesure des ondes sans contact direct par immersion ou par couplage à l'air. Dans le cas du couplage à l'air, le récepteur se déplace le long du profil et enregistre les données automatiquement [24]. Cette procédure permet de réduire le bruit et d'obtenir une meilleure répétitivité du signal. Les avantages des techniques ultrasons sont nombreux :

- ➔ Pouvoir de pénétration supérieur comparé aux techniques soniques ;
- ➔ Sensibilité à la détection de petites discontinuités ;
- ➔ Précision élevée pour la détection des discontinuités, estimation de leur taille, leur forme, leur position, leur nature.

Les méthodes les plus répandues à ce jour sont :

- **La technique d'impact écho** : La technique d'impact écho est basée sur la réflexion des ondes de compression. La méthode a été développée pour l'inspection des structures en béton (Sansalone and Carino, 1986 ; Sansalone, 1997). La méthode utilise un impact à l'aide d'une source ponctuelle de courte durée (bille ou marteau) pour générer une onde mécanique qui se propage dans la structure. La réponse de la propagation des ondes (réflexions multiples dans toutes les directions) dans la structure est enregistrée à l'aide d'un capteur (accéléromètre, capteur piézoélectrique). Le signal enregistré dans le domaine temporel est ensuite transformé dans le domaine fréquentiel par la transformée de Fourier. Le résultat de cette transformation est un spectre d'amplitude qui permet de déterminer la fréquence d'arrivée des réflexions. Cette fréquence correspond à la fréquence d'épaisseur et est indiquée par un pic sur le spectre d'amplitude [18]. Connaissant ainsi cette fréquence, on est en mesure de déterminer

l'épaisseur de la structure. Elle est liée à la norme *ASTM C1383 (98), Standard test method for measuring the P-wave speed and the thickness of concrete plates using the impact Echo method* [25].

- **La technique de pulse écho** : La technique est basée sur la réflexion des ondes de compression et la mesure de la vitesse de propagation du milieu traversé par les ondes. Elle est utilisée en génie civil pour la détection des défauts (vides, fissures) et des dégradations dans les chaussées, l'évaluation de l'adhérence (métaux, composites), l'estimation de l'âge du béton, la détermination de la profondeur des structures. La profondeur des structures ou du défaut peut être déterminée connaissant la vitesse et le temps de propagation aller-retour dans le milieu.
- **La méthode d'essai sonique** : Connue sous le nom Ultrasonic Pulse Velocity Method (UP-V), c'est une méthode basée sur la propagation des ondes de compression. Cette technique permet de déterminer la vitesse de propagation des ondes de compression dans le matériau à partir de la mesure du temps de propagation entre un émetteur un récepteur. Cette technique est souvent utilisée pour l'évaluation de l'homogénéité, de l'expansion et de la qualité du béton. Elle permet aussi de détecter les vides sous les dalles de béton ou dans les pieux, de déterminer la longueur des fondations, de mesurer la profondeur des fissures. Elle est visée par la norme *ASTM C597, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*.
- **La technique de sismique par réfraction** : La sismique réfraction (gamme de fréquences entre 50 et 240 kHz) est utilisée en génie civil pour la détection et l'évaluation de la profondeur des dégradations dans la peau de béton à partir des ondes réfractées. La réfraction se produit lorsque la vitesse dans le milieu inférieur est supérieure à celle du milieu supérieur. La technique permet de déterminer les vitesses des milieux et de ces vitesses, on détermine les profondeurs.

- **La méthode d'analyse spectrale par ondes de surface (SASW)** : Elle est utilisée pour déterminer les épaisseurs, la détection des vides et des fissures dans le béton et pour l'évaluation de l'état de la peau du béton en utilisant les ondes de Rayleigh.
- **La méthode passive ou d'émission acoustique** : La méthode consiste à détecter et à analyser les signaux issus du phénomène de libération d'énergie sous la forme d'ondes acoustiques lorsque la structure est soumise à un champ de contrainte. Les capteurs de détection généralement utilisés sont des capteurs piézoélectriques de fréquence allant de 50 kHz à 1 MHz. Ce sont donc les défauts eux-mêmes et principalement actifs qui génèrent les ondes acoustiques c'est-à-dire le signal à analyser. La technique peut ainsi détecter, localiser une initiation de la rupture et suivre sa propagation.
- **Méthodes basées sur la propagation des ondes de Lamb** : Ces méthodes permettent de déterminer les défauts dans les plaques minces en milieu fini. Dans le béton, elles détectent les vides. Nous utiliserons ces méthodes pour caractériser l'adhérence entre deux bétons.

Les vitesses de propagation de différents types d'ondes sont reliées aux propriétés mécaniques telles que le module d'élasticité dynamique, le coefficient de Poisson et les coefficients de Lamé. Les techniques utilisant les ondes de Rayleigh permettent par exemple de donner des informations sur la qualité du béton d'enrobage.

- **Méthodes d'acoustique non-linéaires** : Parmi les méthodes acoustiques, on distingue les méthodes linéaires et les méthodes non-linéaires selon la réponse du matériau à la propagation d'ondes dans son milieu. En effet, l'acoustique linéaire est basée sur les lois de propagation linéaire des ondes et apporte relativement peu d'indication sur les microfissurations et les petits changements dans un matériau hétérogène comme le béton. Par contre les méthodes basées sur l'acoustique non-linéaire ont une plus grande sensibilité aux micro-défauts. De nombreux travaux de recherche sur l'acoustique non-linéaire ont été développés au GRAI (Groupe de Recherche en Auscultation et en Instrumentation) de l'Université de Sherbrooke, notamment pour l'évaluation de la réaction alcalis-silice (thèses de S. Kodjo, Y. Boukari, F. Moradi-Marani).

### 3.3.2 Les principales méthodes non destructives d'évaluation de la perte de l'adhérence

Les méthodes les plus utilisées pour la détection des défauts (fissurations, vides, délaminages, etc.) responsables de la perte d'adhérence sont :

- **L'inspection visuelle** : C'est une méthode très limitée et subjective, car l'évaluation bien qu'elle soit facile pour des éléments élancés comme les poutres, elle reste complexe pour les dalles. L'évaluation est faite sur l'observation des fissurations visibles sur les bordures des structures. Il faut donc avoir accès aux faces latérales des structures ce qui n'est souvent pas le cas pour les dalles de béton (dalles de chaussée, de ponts, etc.).
- **La méthode géoradar** : Méthode basée sur l'interprétation de la propagation des ondes électromagnétiques dans le béton. Le principe de la méthode consiste à transmettre une onde électromagnétique dans le matériau à l'aide des antennes émettrices (antennes de fréquences entre 200 MHz- et 1 GHz). Les ondes au contact des discontinuités (défauts, barres d'armature, fond des dalles, etc.) réfléchissent et sont ensuite enregistrées à l'aide des antennes réceptrices, traitées et interprétées. La méthode permet de détecter les vides, le délaminage, les nids d'abeilles, les barres d'armature, etc., et d'évaluer la profondeur de ces structures. Cependant les défauts d'épaisseurs inférieures au millimètre ne sont pas détectables par GPR.
- **La méthode de thermographie infrarouge** : L'imagerie de la structure représente une carte de distribution de la température de surface en fonction de l'état de dégradation. Les zones dégradées soumises au flux de chaleur sont caractérisées par de fortes températures. Cependant, les défauts évalués sont des défauts de surface. C'est donc une méthode limitée en termes d'évaluation de l'adhérence à des profondeurs inférieures à 5 cm sous les dalles.
- **Les méthodes acoustiques** : Les méthodes les plus utilisées décrites aux paragraphes précédents sont la méthode de la réponse impulsionnelle (RI), la méthode d'impact écho, la méthode Ultrasonic Pulse Velocity, la méthode passive ou d'émission acoustique.

Le **tableau 3.1** représente un tableau récapitulatif de quelques méthodes d'auscultation.

Tableau 3.1 : Principales méthodes utilisées pour le contrôle du béton (Malhotra, 1991) [18].

Propriétés à étudier	Méthodes	Type d'équipement
Corrosion des barres d'armature	Potentiel « half-cell »	Électrochimique
	Résistivité	Électrique
	Résistance linéaire de polarisation	Électrochimique
	Impédance	Électrochimique
	Épaisseur de la couche d'enrobage	Électromagnétique
	Profondeur de carbonatation	Chimique/Microscopique
	Concentration en chlorures	Chimique/Électrique
Qualité, durabilité, et détérioration du béton	Dureté de la surface extérieure	Mécanique
	Vitesse ultrasonique d'impulsion	Acoustique
	Radiographie	Radioactif
	Radiométrie	Radioactif
	Absorption des neutrons	Radioactif
	Humidité relative	Chimique/Électrique
	Perméabilité	Hydraulique
	Absorption	Hydraulique
	Pétrographie	Microscopique
	Teneur en sulfate	Chimique
	Dilatation	Mécanique
	Porosité	Microscopique/Hydraulique
	Type de ciment	Chimique/Microscopique
	Résistance à l'abrasion	Mécanique
Résistance du béton	Prélèvements	Mécanique
	Pull out	Mécanique
	Pull off	Mécanique
	Compression	Mécanique
	Fracture interne	Mécanique
	Résistance à la pénétration	Mécanique
	Maturité	Chimique/électronique
	Cure	Électrique/électronique
Intégrité et performance	Tassement	Mécanique
	Pulse écho	Mécanique/électronique
	Émission acoustique	Électronique
	Thermoluminescence	Chimique
	Thermographie	Infrarouge
	Réponse dynamique ou impulsionnelle	Mécanique/électronique
	Radar	Électromagnétique
	Location des barres d'armature	Électromagnétique
	Mesures de la fissuration	Optique/mécanique/électrique
	Mise en charge	Mécanique/électronique/électrique



### 3.3.3 Conclusion

Le choix des méthodes lors d'auscultation dépend notamment de la profondeur de la structure à mesurer, de la résolution verticale (capacité de la technique à différencier deux interfaces rapprochées situées l'une au-dessus de l'autre) et horizontale (la capacité de la technique à dissocier deux discontinuités rapprochées situées sur le même plan horizontal pour détecter les défauts) et du rapport signal/bruit.

Les méthodes acoustiques sont basées sur l'interprétation de la propagation des ondes et leur interaction avec les différents constituants des matériaux. Les ondes sont générées en basses fréquences ou en hautes fréquences. La nature des ondes générées détermine leur capacité à se propager dans les matériaux et leur capacité à déterminer les défauts. Ainsi, en présence d'un vide, presque toute l'énergie est réfléchi à l'interface vide/béton [35]. Il existe une diversité de méthodes acoustiques.

Dans ce projet de doctorat, nous nous intéresserons particulièrement à la méthode de vibration aux basses fréquences de la RI pour l'évaluation de l'adhérence. Les méthodes GPR, de thermographie infrarouge et d'essai sonore serviront d'outils de comparaison et de validation des résultats expérimentaux. Ce sont des méthodes pertinentes en termes de détection, de détection et de caractérisation des paramètres de défauts. Une étude paramétrique détaillée permettra de montrer les avantages ainsi que les limites de chaque méthode dans la caractérisation des défauts d'interface à l'origine de la perte de la qualité de l'adhérence entre deux bétons.

## CHAPITRE 4

# APPLICATION DE LA MÉTHODE DE LA RI À LA DÉTECTION DES DÉFAUTS ET À L'ÉVALUATION DE LA DÉCOHÉSION DANS LES STRUCTURES EN BÉTON ET DANS LES PLAQUES MINCES

### 4.1 Introduction et historique de la méthode de la Réponse Impulsionnelle

La méthode de la réponse impulsionnelle (RI), connue aussi sous les appellations de *Transient Dynamic Response*, *Impulse Response Test*, méthode vibratoire ou bien encore méthode d'admittance mécanique, est une méthode d'auscultation développée en France dans les années 1960 par Jean Paquet et son équipe du CEBTP. Elle a été utilisée pour la première fois pour l'évaluation de l'intégrité des pieux. Les travaux élaborés ont permis de démontrer qu'il est possible avec cette méthode de déterminer les défauts, les vides sous la dalle, de mesurer la longueur et la rigidité des pieux, d'évaluer la qualité du béton et la perte de qualité du support sous une dalle. Les mesures furent appliquées sur des pieux réels à Porcheville en France.

Dans les années 1960, la méthode de la RI était déjà appliquée dans le secteur de l'aéronautique pour le contrôle des structures mécaniques. Son application dans le domaine du génie civil avait nécessité l'utilisation des sources d'impact plus puissantes de très basses fréquences.

Par la suite, la méthode a connu une avancée considérable du point de vue du développement technologique concernant le matériel d'acquisition des données, de traitement et simulation numérique. À partir des années 1980, les premiers équipements dotés d'ordinateurs de grandes capacités munis de systèmes d'acquisition, de stockages et de traitement des données sont nés. Le matériel de traitement des données permet de transformer rapidement la réponse du signal

du domaine temporel au domaine fréquentiel et de faciliter l'interprétation des paramètres. Les ordinateurs peuvent ainsi être transportés sur le terrain et sont capables de transformer la réponse d'une structure en fonction d'une force d'impact dans le domaine des fréquences (Stain, 1982 ; Olson et al., 1990) [18] et déterminer facilement la variation de la mobilité en fonction de la fréquence.

Dans ce chapitre, nous présenterons les principes fondamentaux de la méthode appliqués à l'évaluation des structures en béton et particulièrement à la détection des vides sous les dalles. Nous présenterons également les équipements de mesure, les applications et les limitations.

## 4.2 Principe et théorie de la méthode de la RI

La méthode de la RI est basée sur l'interprétation de la réponse d'une structure sous l'effet d'une excitation par ondes mécaniques. Le principe (**Figure 4.1**) consiste à créer une vibration mécanique à la surface de la structure à ausculter à l'aide d'un marteau muni d'un capteur de force qui mesure la force d'impact appliquée et la durée de contact entre le marteau et la structure.

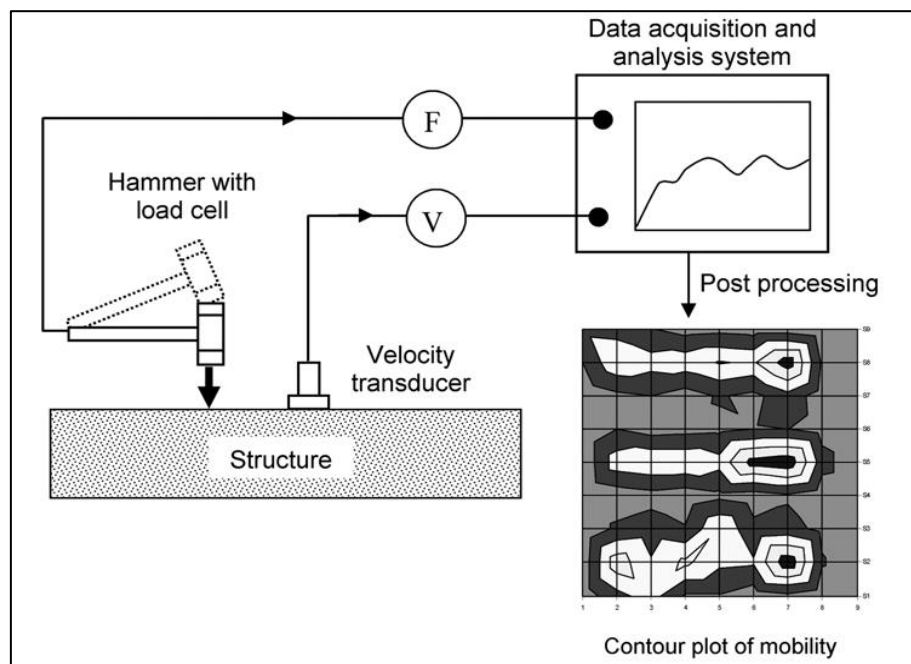


Figure 4.1 : Principe de la méthode de la RI (ASTM C1740) [23].

L'excitation mécanique génère une onde qui se propage à travers le matériau et réfléchit sur les discontinuités, les interfaces ou sur les défauts (vides, nids d'abeille, fissures, etc.). Un transducteur de vitesse ou géophone dont la gamme de fréquences s'étend jusqu'à 2,5 kHz enregistre les vibrations à la surface du matériau.

Les signaux temporels de vitesse et de force d'impact sont amplifiés à l'aide d'un amplificateur. L'analyse des données est effectuée dans le domaine fréquentiel bien que les données de vitesses acquises peuvent aussi être analysées dans le domaine temporel comme dans le cas de la technique d'essai sonique. Pour convertir les signaux de la force d'impact et de vitesse du domaine temporel vers le domaine fréquentiel, on applique la Transformée de Fourier rapide (FFT). Le résultat du traitement consiste à représenter graphiquement la courbe de mobilité spectrale, ou courbe d'admittance (**Figure 4.2**), du matériau au point d'impact qui est la variation du rapport entre la vitesse de vibration spectrale et la force spectrale exprimée en fonction de la fréquence, généralement comprise entre 0 et 2000 Hz (Davis A. G., 1998). La mobilité est définie par l'équation 4.1 :

$$\frac{V_0}{F_0} = \text{mobilité} \quad (4.1)$$

Dans l'évaluation des structures de type plaque, la mobilité est un critère qui permet de mesurer la flexibilité relative des matériaux. Cette flexibilité dépend de l'épaisseur de la plaque, du module d'élasticité du béton, de l'état du support et de la présence des défauts dans la structure. Ainsi, une forte mobilité correspond à une flexibilité du matériau relativement élevée au point d'impact.

La courbe de la mobilité spectrale est ensuite analysée en vue de caractériser l'ensemble des paramètres structuraux à l'origine de la réponse du matériau à l'impact provoqué. L'interprétation de cette courbe permet d'apporter des informations sur l'état de la structure et de l'adhérence entre deux matériaux. Elle permet de caractériser la rigidité dynamique, de détecter la présence des vides dans une dalle ou à l'interface entre deux dalles, d'évaluer la densité et l'épaisseur de la structure auscultée et de juger de l'état de consolidation du béton, de la qualité du béton et de la qualité du support.

Dans le cas de l'évaluation des structures en plaque, l'interprétation des résultats est basée principalement sur le calcul à partir de la courbe de mobilité des paramètres suivants :

- La rigidité dynamique de la dalle ;
- La mobilité moyenne ;
- La pente de la mobilité ;
- Le rapport entre le pic maximal de mobilité et la mobilité moyenne.

Les aspects théoriques de la méthode de la RI sont basés sur la théorie de la réponse de la mobilité d'un pieu reposant sur un sol homogène développée par Davis et Dunn (1974) [18]. Ces aspects ont ensuite été appliqués à l'analyse de la courbe de mobilité dans d'autres structures telles que les dalles de béton. En effet, pour caractériser la courbe de mobilité, Davis et Dunn (1974) ont considéré un pieu parfait de longueur  $L$  reposant sur une surface d'une fondation élastique [18]. À l'extrémité de ce pieu, une force axiale sinusoïdale continue d'intensité maximale fut appliquée. Puis un capteur placé près du point d'impact a permis d'enregistrer une vitesse maximale de propagation des ondes de compression. La transformation de la force et de la vitesse dans le domaine fréquentiel a permis d'obtenir une courbe de mobilité dont des pics d'amplitude successifs correspondent aux fréquences de résonance de la structure (**Figure 4.2**).

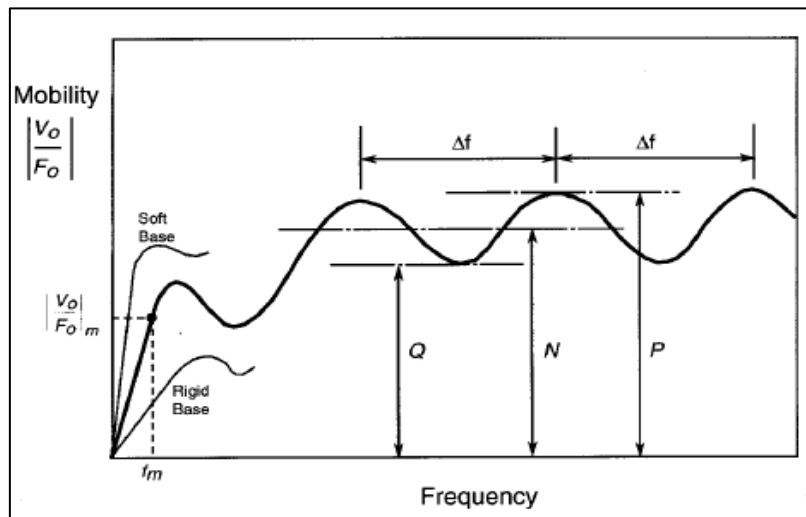


Figure 4.2 : Exemple de courbe théorique de la mobilité d'un pieu parfait reposant sur un sol homogène [18].

La variation fréquentielle entre les pics est définie par l'équation 4.2

$$\Delta_f = \frac{V_L}{2L} \quad (4.2)$$

Avec  $V_L$ , la vitesse de propagation des ondes de compression (m/s) le long de l'axe de la pile et  $L$ , la longueur de la pile (m).

### 4.3 Analyses et interprétations des données

L'application de la méthode de la RI sur les dalles est effectuée principalement pour identifier, les délaminages du béton, les vides sous les dalles. Le principe d'évaluation, d'analyse et d'interprétation des données est basé selon les principes théoriques empiriques et est régi par une norme ASTM, ASTM C1740 [23]. Ainsi les dalles qui peuvent être évaluées sont [26] :

- Les dalles de béton ;
- Les dalles des chaussées ;
- Les dalles de voies ferroviaires ;
- Les dalles de barrages ;
- Les dalles de ponts ;
- Les dalles des tunnels, etc.

Pour de telles structures en plaques notamment les dalles en béton (**Figure 4.3**), l'interprétation de la courbe de mobilité spectrale entre la gamme de fréquences 0 et 800 Hz [27] permet d'apporter des informations utiles sur la rigidité dynamique de la structure, les propriétés d'amortissement de la dalle, la qualité de support sous une dalle et l'intégrité du béton dans les matériaux contrôlés, la présence possible ou non des défauts. Ces caractéristiques sont entre autres responsables de la perte d'adhérence entre deux bétons. L'évaluation des structures en plaque est basée principalement sur le calcul à partir de la courbe de mobilité des paramètres suivants :

- La rigidité dynamique de la dalle ;
- La mobilité moyenne ;
- La pente de la mobilité ;
- Le rapport entre le pic maximal de mobilité et la mobilité moyenne.

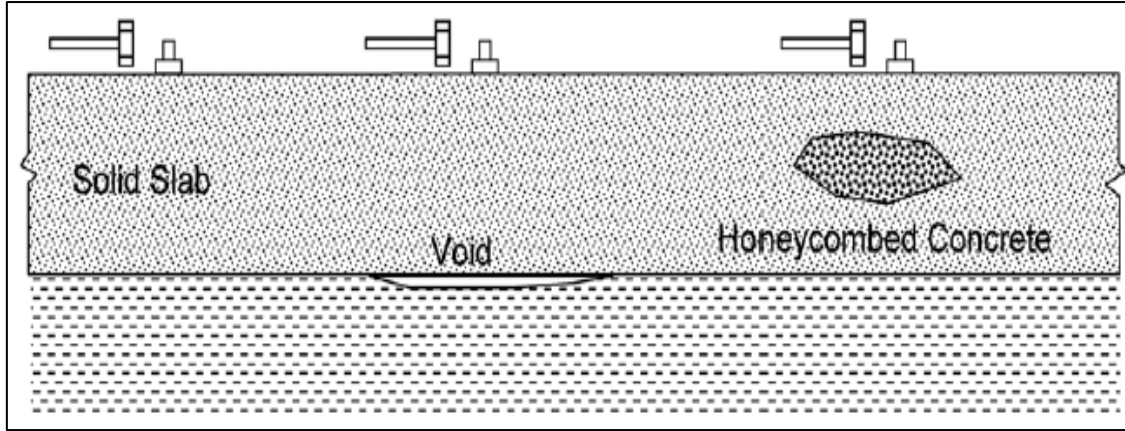


Figure 4.3 : Représentation schématique d'une dalle de béton supportée par un sol, caractérisée par des vides entre la dalle et le sol, et des nids d'abeille dans la dalle de béton [23].

### 4.3.1 La rigidité dynamique

La pente initiale de la courbe de mobilité (**Figure 4.4**) représente la compliance statique, la souplesse dynamique ou la flexibilité dynamique autour du point de mesure. Sur la courbe de mobilité, elle est définie entre 0 et 100 Hz. L'inverse de la flexibilité dynamique est la rigidité dynamique et est exprimée en N/m [28, 29].

Plus la pente est forte, moins la structure est rigide. La rigidité dynamique est définie par l'équation IV.3. La rigidité dynamique au point de contrôle dépend de la qualité relative du béton, du module d'élasticité, de l'épaisseur relative de la structure et de l'état du support sur lequel repose la structure auscultée et de la présence des défauts internes (vides, fissurations, nid-abeilles, etc.) [23,31]. La rigidité dynamique  $k_d$  est calculée à partir de l'équation 4.3 :

$$F_0 = k_d \frac{V_0}{\omega} \quad (4.3)$$

avec  $\omega = 2\pi f_m$ , d'où :

$$k_d = \frac{2\pi f_m}{\left(\frac{V_0}{F_0}\right)} \quad (4.4)$$

Avec  $f_m$ , la fréquence correspondant à la fin de la partie linéaire de la courbe de mobilité,  $V_0$  et  $F_0$  respectivement les signaux de vitesse et force dans le domaine fréquentiel.

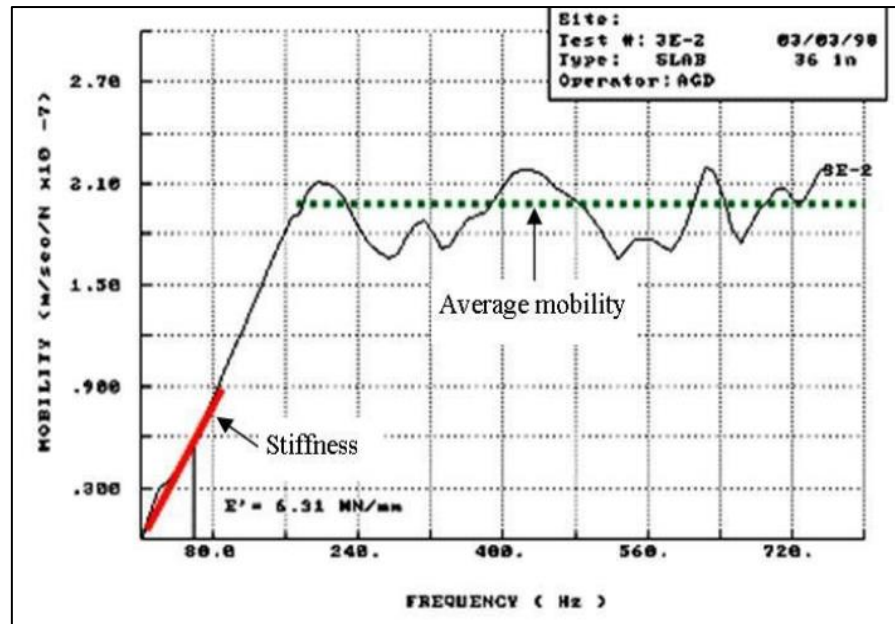


Figure 4.4 : Représentation de la courbe de mobilité à partir d'un point de mesure – Calcul de la rigidité dynamique à partir de la pente comprise entre 0 et 100 Hz [30].

### 4.3.2 La mobilité moyenne

La valeur de la mobilité moyenne est comprise entre 100 et 800 Hz et dépend directement de la densité, de l'épaisseur de la plaque et de la qualité du support. Une réduction de l'épaisseur induit une forte augmentation de la mobilité moyenne.

Lorsqu'il se produit un décollement total d'une couche supérieure ou de la dalle supérieure, la mobilité moyenne augmente du fait de la réduction de l'épaisseur de la couche supérieure décollée. En d'autres termes, la dalle devient plus mobile. Aussi, la présence des fissures, des microfissurations ou des nids d'abeille dans le béton réduira également l'amortissement structural, la stabilité de la structure [28, 23] et par conséquent entraînera une augmentation de la mobilité dans l'intervalle des fréquences entre 100 et 800 Hz (**Figure 4.5**).

Les variations de la mobilité moyenne pour une structure dont l'épaisseur est constante peuvent être révélatrices des zones affectées par des défauts et des inspections plus poussées sont par conséquent nécessaires. Des techniques supplémentaires telles que la technique d'impact-écho ou les techniques de carottage peuvent être effectuées sur des zones de forte mobilité moyenne pour confirmer ou valider les fortes variations sur la qualité du béton.



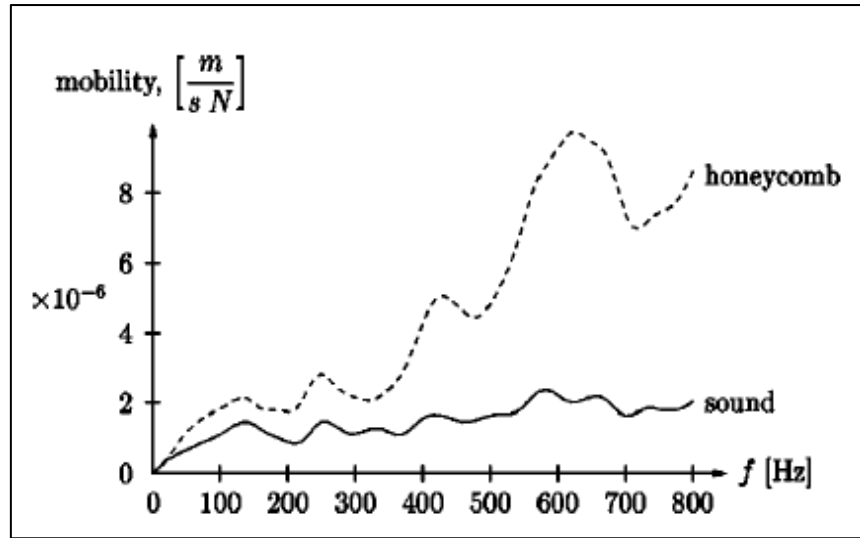


Figure 4.5 : Courbes de mobilité d'un béton sain (sound) et d'un béton dégradé (honeycomb) [27].

La mobilité moyenne est définie par l'équation 4.5 :

$$N = \sqrt{PQ} \quad (4.5)$$

Les mobilités  $P$  et  $Q$  correspondant aux amplitudes maximums et minimums respectivement des pics de résonance (Davis A. G., 1998). Les variations de la mobilité moyenne enregistrées à travers une zone de mesure sur seulement une surface visible, cas des dalles supportées par le sol ou des murs de soutènement, peuvent être dues aux changements de l'épaisseur de la structure, des propriétés des matériaux, de l'état de support [23]. La technique d'impact-écho peut aider à évaluer les variations possibles de l'épaisseur de la structure.

#### 4.3.3 Le rapport entre le pic maximal de mobilité et la mobilité moyenne

Lorsqu'il y a un décollement ou un délaminage du béton ou lorsqu'il y a une perte de capacité du support de la dalle (présence des dégradations, défauts, vides, fissures, etc.), la pente initiale de la courbe de la mobilité accroît fortement. Le premier pic de la mobilité en dessous de la fréquence de 100 Hz devient sensiblement supérieur par rapport à la mobilité moyenne définie entre 100 et 800 Hz (**Figure 4.6**). Le rapport entre le pic maximal de mobilité et la mobilité moyenne ou appelé indice du vide est un indicateur de la présence de décollement dans la structure ou la présence de la perte de capacité du support sous la dalle de béton (vides sous la

dalle) [23, 29]. Ce paramètre donne également des informations sur la présence du délaminage ou des vides dans le béton. Ainsi les valeurs de l'indice du vide sont faibles dans les zones problématiques et élevées dans les zones saines, zones de faible mobilité moyenne.

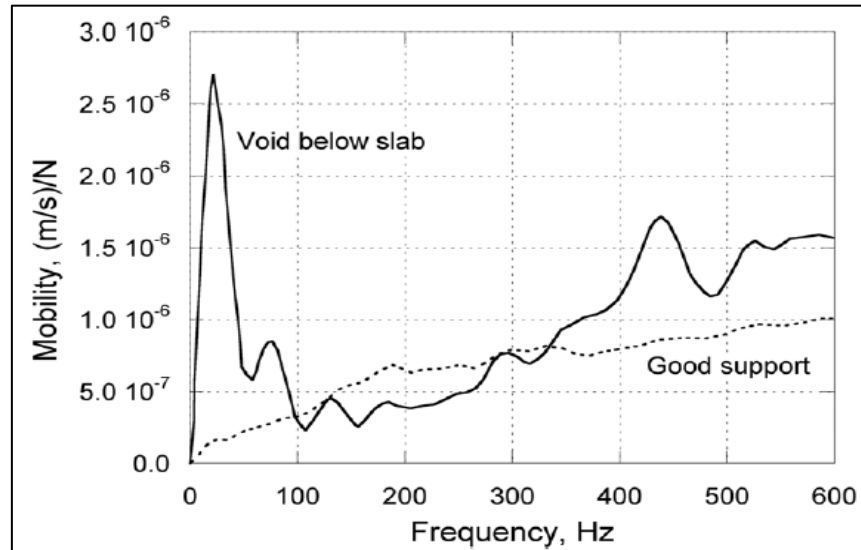


Figure 4.6 : Courbes de mobilité spectrale d'un béton sain (courbe en pointillés) et d'un béton dégradé (courbe en trait plein) [23].

#### 4.3.4 La pente de mobilité

La pente de la mobilité est définie entre 100 et 800 Hz. Elle est utilisée pour donner des informations sur la qualité de consolidation du béton. Une cartographie de la pente de mobilité peut être représentée pour indiquer les zones de fortes probabilités de béton faiblement consolidé. Une forte pente de mobilité correspond aux régions où le béton est faiblement consolidé ou indique la présence des nids d'abeille dans la structure.

La présence d'un défaut tel un nid-d'abeilles dans le béton conduit à une réduction de l'atténuation de la réponse et affecte la stabilité de la courbe de la mobilité. Lorsqu'on compare les courbes de mobilité mesurées sur un point de béton sain et sur un point de béton dégradé ou un béton caractérisé par la présence des défauts tels que les nids d'abeille, on observe une augmentation de la pente de la mobilité entre 100 et 800 Hz pour un béton dégradé tandis que dans la zone de béton sain, on observe une variation quasi constante de la pente de la mobilité dans la même gamme de fréquences (**Figure 4.7**, p. 54). Une forte pente moyenne ou une

l'instabilité de la courbe de mobilité est un indicateur de forte probabilité de la présence des nids d'abeille dans la structure de béton.

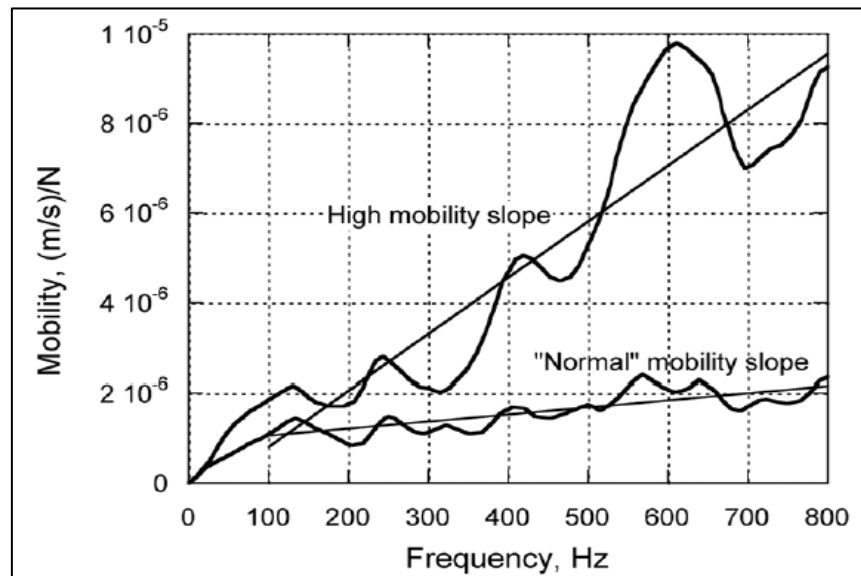


Figure 4.7 : Courbes de mobilité spectrale entre une zone faiblement consolidée (High mobility slope) et une zone de béton sain (Normal mobility slope) [23].

L'évaluation de l'état du support se fait donc en se basant sur deux paramètres de mesures [26] :

- La rigidité dynamique. La pente initiale entre 0 et 50 Hz de la courbe de mobilité indique la flexibilité quasi statique du système. Plus la pente d'initiale est forte moins le système est rigide.
- La forme ou l'énergie de la courbe de mobilité entre les fréquences 100 et 800 Hz est un indicateur de l'état du support. La courbe de la réponse est plus irrégulière et a une forte mobilité pour un support affecté par les vides que pour un support sans défauts. Cette différence est liée à la diminution de l'amortissement de la réponse de vibration de la dalle due la présence des vides.

Le délaminage ou les vides affectent le béton et cela se traduit par une forte mobilité dans les basses fréquences (**Figure 4.6**) par contre dans les hautes fréquences, les variations de la courbe de mobilité sont faibles. La présence des nids d'abeille dans le béton se traduit par une augmentation de la mobilité dans les hautes fréquences (**Figures 4.7**), alors que dans les basses fréquences celle-ci est moins affectée.

## 4.4 Travaux antérieurs – Applications – Avantages et Limites

De nombreux travaux ont permis de montrer que cette méthode de la RI est utilisée de manière subjective et n'est pas basée sur des fondements théoriques solides et souvent les résultats obtenus ne sont pas interprétables. Les fondements théoriques dont on dispose aujourd'hui sont basés sur les premiers travaux expérimentaux et théoriques réalisés sur les pieux [18].

La détection de la perte d'adhérence sous les dalles repose sur l'analyse de la variation de la flexibilité ou de la mobilité ou de la rigidité de la dalle. En effet, la présence des vides sous les dalles se traduit par une partie importante de l'énergie de l'onde réfléchi en surface, ce qui est à l'origine de l'augmentation de la flexibilité et d'une réponse dynamique faiblement amortie [29]. Le paramètre de la courbe de mobilité spectrale qui décrit au mieux la présence de vide ou le décollement entre deux dalles est le rapport entre le pic maximal de mobilité et la mobilité moyenne. En effet, en présence d'un vide le pic de mobilité en-dessous de 100 Hz sur la courbe de mobilité devient très fort par rapport à la mobilité moyenne entre 100 et 1000 Hz (**Figure 4.6**). Ainsi les vides peuvent être détectés en comparant les courbes de mobilité mesurées sur différents points de la dalle. La détection du délaminage est basée sur le même principe de détection des vides.

Plusieurs travaux expérimentaux et scientifiques menés ont permis à partir de la méthode de la RI de détecter les vides, les nids d'abeille, les délaminages, les décollements dans les dalles de béton.

Au-delà des premiers travaux sur l'évaluation des pieux [18, 31, 30, 32], de nombreux travaux ont permis :

- La détection des vides sous les dalles de béton des voies ferrées [4] ;
- La détection des vides sous les dalles des autoroutes et des murs (Davis et Hertlein, 1987) [27] ;
- L'évaluation des fondations profondes (Davis et Hartlein, 1990) [5] ;
- La détection des vides derrière les voussoirs sous le tunnel de la manche en Europe (1989) [33] ;
- La détection de délaminages du béton (Davis et Hertlein, 1995) [27] ;

- La détection des nids-d'abeilles et les fissurations (Davis et Hertlein 1995, Davis et al. 1997) [5, 39].

D'autres travaux ont été également réalisés pour :

- L'évaluation de la réaction alcali-silice dans les pieux de béton (Davis et Kennedy, 1998) [33] et le problème de décollement du béton (Davis et al. 1996) [27, 34] ;
- L'évaluation du comportement d'une dalle de béton supportée par le sol [27] ;
- La détection des vides causés par des dégradations de dalles de béton sous les chaussées d'autoroutes [35], des déversoirs de barrages et des dalles supportées par le sol [32] ;
- La détection de délaminages de revêtements de sol en béton sur de grandes surfaces [36] ;
- La détection de délaminages du béton causé par la corrosion des barres d'armature dans les dalles, murs et structures larges telles que les barrages, les cheminées et les silos, détecter la position des défauts ou la profondeur des piles [37, 38].

## 4.5 Conclusion

La méthode de la RI est l'une des méthodes non destructives les plus prometteuses et les mieux adaptées de par sa capacité à mieux caractériser de l'étendue des défauts d'interface de petite taille et de très faible ouverture (les microfissurations, les vides, les nid-abeilles, etc.), à évaluer la consolidation du béton, le délaminage du béton ainsi que de la perte de capacité de support des dalles, principaux facteurs qui contribuent à la perte de la rigidité précoce des dalles de béton.

Les avantages de la RI sont aussi du point de vue économique en matière de simplicité, de rapidité de sa mise en œuvre, la possibilité de faire des mesures sur de larges structures en béton, et d'obtenir les résultats en temps réel.

Des zones de la structure auscultée où les mesures de la mobilité seraient anormalement trop élevées peuvent être sélectionnées pour des essais plus approfondis, ou l'utilisation d'autres méthodes d'essai telles que la méthode d'impact écho ou la méthode géoradar paraît nécessaire

pour la validation des résultats. Les méthodes de carottage bien que destructives peuvent aussi être utilisées pour vérifier et confirmer les résultats de la RI.

L'analyse et l'interprétation des données reposent encore sur les lois empiriques décrites dans la norme ASTM C1740. Cependant l'étude bibliographique a montré :

- La difficulté et la complexité à analyser la réponse vibratoire de la structure auscultée lorsque les conditions d'acquisition ne sont pas conformes à la norme ou lorsque les mesures sont affectées par des bruits.
- Que la méthode ne permet pas de déterminer la taille des défauts avec précision et d'évaluer l'épaisseur et la profondeur des défauts.
- Que d'autres facteurs affectent la réponse vibratoire, dont le module d'élasticité, les dimensions de la dalle, les dimensions du défaut, la profondeur du défaut, la position du point d'impact, etc.
- Que les courbes de mobilité spectrale ne fournissent pas des informations sur les différents modes propres et fréquences de résonance. Pour une dalle avec un défaut par exemple, aucune étude ne permet d'associer les modes propres et les fréquences de résonance sur une courbe de mobilité à la vibration du défaut.

# CHAPITRE 5

## LA PROPAGATION DES ONDES ACOUSTIQUES ET LES VIBRATIONS MÉCANIQUES DES STRUCTURES DE TYPE PLAQUE

Ce chapitre présente les principes théoriques qui gouvernent les lois de la propagation des ondes acoustiques et vibrations mécaniques dans les structures en béton et en particulier dans les plaques minces.

### 5.1 Propagation des ondes acoustiques

L'acoustique est le domaine de la science qui concerne la création, la propagation et la détection des vibrations élastiques. Le domaine acoustique touche les secteurs tels que les sciences de la terre et de l'atmosphère, les sciences de l'ingénieur, les sciences de la vie et de la santé ainsi que les sciences humaines et sociales.

#### 5.1.1 Définition des ondes acoustiques

Une onde se définit comme la propagation d'une perturbation dans un milieu de la variation réversible des propriétés physiques. Il existe trois principaux types d'ondes : les ondes électromagnétiques, les ondes gravitationnelles et les mécaniques ou acoustiques.

- **Les ondes électromagnétiques** : Elles résultent d'une combinaison entre le champ électrique et magnétique. Ces ondes se propagent dans tous types de milieux et ne nécessitent pas de support matériel.
- **Les ondes gravitationnelles** : Elles ne nécessitent pas non plus de support matériel pour se propager. Ce sont des déformations de la géométrie de l'espace-temps qui se propagent.
- **Les ondes mécaniques ou acoustiques** : les ondes acoustiques se définissent comme une propagation dans un milieu de la vibration des atomes autour de leur position

d'équilibre. Il y a propagation d'ondes lorsqu'il y a un apport d'énergie, l'existence d'un milieu matériel et un transfert d'énergie (forces élastiques). Les ondes acoustiques sont classées en quatre catégories. On distingue :

- **Les infrasons** : Ondes dont les fréquences de vibration des particules sont inférieures à 20 Hz ;
- **Les sons** : Ondes dont les fréquences de vibration des particules sont comprises entre 20 Hz et 16000 Hz ;
- **Les ultrasons** : Ondes dont les fréquences de vibration des particules sont supérieures à 16 kHz ;
- **Les hypersons** : Ondes dont les fréquences de vibration des particules sont supérieures à 1 GHz.

### 5.1.2 Caractéristiques d'une onde acoustique

Comme tout type d'onde, les ondes acoustiques sont caractérisées par une amplitude, une fréquence, une vitesse de propagation, une longueur d'onde, une période, des propriétés d'atténuation et de dispersion :

- **L'amplitude** : C'est le déplacement maximal ou minimal des particules par rapport à la position d'équilibre ;
- **La longueur d'onde** : C'est la distance minimale entre deux particules dans le même état vibratoire. Elle est exprimée en mètre (m). La longueur d'onde détermine la capacité de chaque technique acoustique à détecter les défauts dans les dalles de béton. Ainsi les défauts qui sont détectés sont des défauts dont la taille est de l'ordre ou de taille plus grande que la longueur d'onde ;
- **La fréquence** : C'est le nombre d'oscillations effectuées par seconde par une particule en vibration en passant par sa position d'équilibre. La fréquence est exprimée en Hertz (Hz) ;
- **La période** : C'est le temps exprimé en seconde (s) mis par la perturbation pour parcourir une longueur d'onde. La période est égale à l'inverse de la fréquence de vibration ;
- **La vitesse de propagation des ondes acoustiques (V)** : C'est la distance parcourue par une onde en une seconde. Elle s'exprime en m/s. Elle est définie par l'équation **5.1** :



$$V = \lambda * f \quad (5.1)$$

Avec :  $\lambda$  = la longueur d'onde (m) et  $f$  = la fréquence (Hz)

### 5.1.3 Propagation des ondes acoustiques dans un milieu homogène, élastique, linéaire et isotrope

La propagation des ondes se produit lorsqu'une pression ou une déformation est appliquée à la surface d'un solide. La perturbation dans le cas des ondes acoustiques se traduit par un déplacement des particules, se propage à travers la matière solide et la réponse du signal est enregistrée au moyen d'un capteur. La vitesse de propagation des ondes dans un milieu élastique dépend du module d'élasticité, du coefficient de Poisson, de la densité, et de la géométrie du solide [18]. Lors de la perturbation de la structure, deux types d'ondes peuvent être enregistrées : les ondes de volume et les ondes de surface. Les ondes de volume qui se propagent en profondeur et les ondes de surface se propagent à la surface des matériaux (**Figure 5.1**).

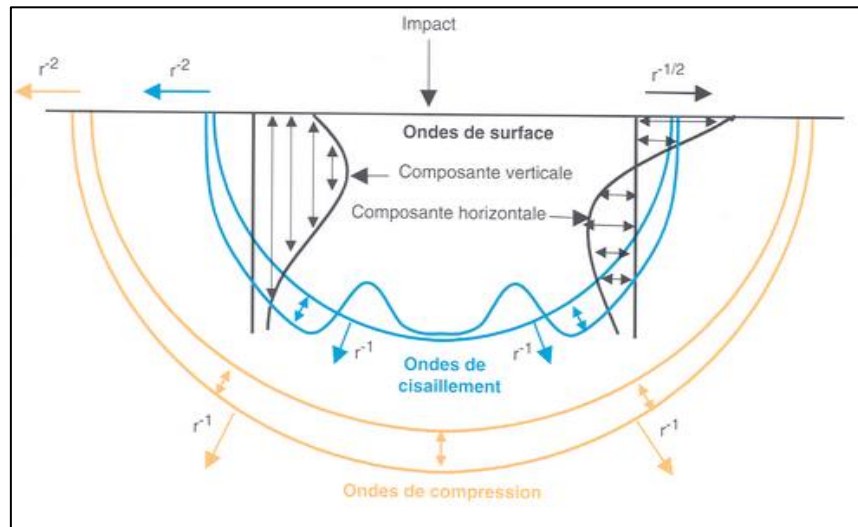


Figure 5.1 : Front d'onde généré par une source ponctuelle dans un milieu semi-infini, homogène, élastique et isotrope [38].

#### 5.1.3.1 Les ondes de volume

Les ondes de volumes se propagent en profondeur. En fonction du mode de propagation, elles sont réparties en deux types d'ondes, les ondes longitudinales et les ondes transversales (**Figure 5.2**).

### ➤ Les ondes longitudinales

Ce sont des ondes dites de compression ou dilatation, car lors de leur propagation, les particules sont soumises aux contraintes de compression et de dilatation. Ces ondes sont aussi appelées ondes primaires ou ondes P, car ce sont les premières ondes qui sont enregistrées. Le mouvement des particules est parallèle à la direction de propagation des ondes. Ces ondes longitudinales se propagent dans les milieux solides et les liquides.

### ➤ Les ondes transversales

Ce sont des ondes de cisaillement, car le déplacement des particules s'accompagne des contraintes de cisaillement. Elles sont appelées aussi ondes secondaires ou ondes S, elles sont plus lentes que les ondes de compression. Le déplacement des particules dans un matériau est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde. Les ondes transversales ne se propagent que dans les milieux solides.

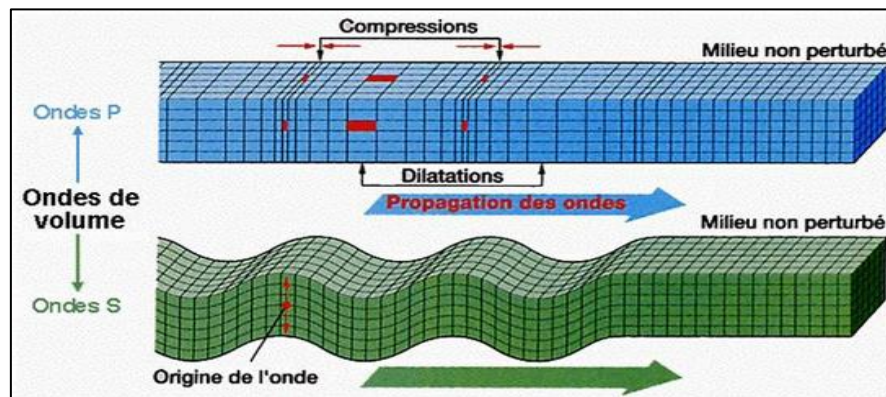


Figure 5.2 : Modes de propagation, Onde longitudinale (P), Onde transversale (S) [32].

#### 5.1.3.2 Les ondes de surface

Les ondes de surface sont de deux types, les ondes de Love et les ondes de Rayleigh (Figure 5.3). Ces ondes se propagent uniquement dans des milieux semi-infinis.

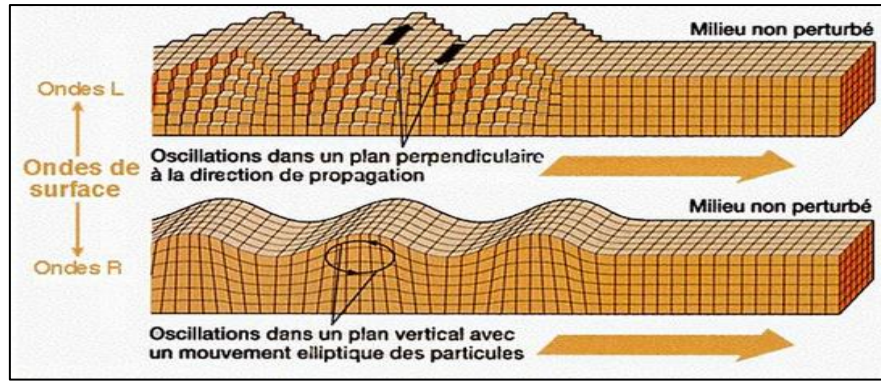


Figure 5.3 : Ondes de surface, onde de Love (L) et Onde Rayleigh (R) [32].

- **Les ondes de Rayleigh** résultent de la combinaison complexe entre les ondes longitudinales et les ondes transversales. Dans un milieu semi-infini limité par une surface plane, ces ondes se propagent à la surface de la plaque tant que l'épaisseur de celle-ci reste supérieure par rapport la longueur d'onde. Leur profondeur de pénétration est de l'ordre de la demi-longueur d'onde et leur amplitude est atténuée exponentiellement avec la profondeur.

Les ondes de Rayleigh sont caractérisées par le déplacement des particules suivant des mouvements elliptiques et des mouvements qui sont parallèles à la direction de propagation. Les ondes de Rayleigh sont non dispersives en milieu homogène et sont dispersives dans un milieu hétérogène (cas des milieux stratifiés ou à gradient continu) dans lequel les propriétés mécaniques varient avec la profondeur et sont utilisées pour estimer les caractéristiques des matériaux (Épaisseur, module d'élasticité et l'état des interfaces).

- **Les ondes de Love** sont caractérisées par des déplacements des particules dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation. Leur amplitude diminue avec la profondeur. Elles sont à l'origine de nombreux dégâts lors des tremblements de Terre.

Dans des milieux finis, il se forme un autre type d'onde entre deux interfaces d'une plaque. Ce sont les ondes de Lamb. Découvertes par Horace Lamb en 1917, les ondes de Lamb résultent de la combinaison entre les ondes longitudinales (P) et les ondes transversales verticales (SV)

se propageant le long d'une plaque mince de dimensions finies avec des frontières parallèles libres dont l'épaisseur de celle-ci est supérieure à la longueur d'onde des signaux.

## 5.2 Vibrations des structures mécaniques

Les vibrations des solides élastiques sont de petits mouvements qui se produisent autour d'une position d'équilibre statique stable. Ces mouvements sont engendrés par des forces dynamiques et se superposent aux forces statiques (**Figure 5.4**).

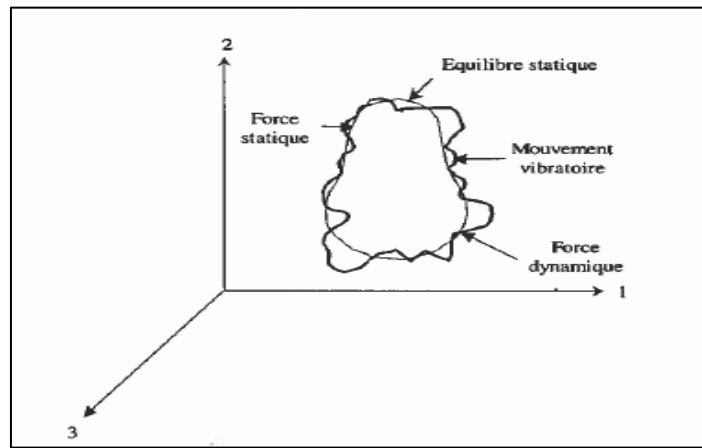


Figure 5.4 : Position d'équilibre statique et mouvement vibratoire [40].

Les mouvements vibratoires des solides élastiques en absence des forces extérieures dans un milieu semi-infini, homogène, élastique, linéaire et isotrope de densité  $\rho$  soumis à une perturbation sont régis par l'équation du mouvement selon la relation fondamentale de la dynamique (**Équation 5.2**) et les relations de comportement entre les contraintes et les déformations (**Équation 5.3**), telles que :

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \text{div} \sigma_{ij} \quad \text{ou} \quad \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \sigma_{ij,j} \quad (5.2)$$

Le terme de gauche représente les 3 composantes du champ de déplacement tandis que le terme de droite représente le tenseur des contraintes :

- $\sigma_{ij}$  : le tenseur des contraintes ;
- $\vec{u} = (u_1, u_2, u_3)$  : le vecteur de déplacement ;

-  $i, j = 1, 2, 3$ .

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (5.3)$$

Avec  $i, j, k, l = 1, 2, 3$ .

La résolution de ces équations consiste à déterminer les champs de déformations (Équation 5.4) et les champs de contraintes (Équation 5.5).

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x}, & \varepsilon_{xy} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial v}{\partial y}, & \varepsilon_{yz} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial w}{\partial z}, & \varepsilon_{zx} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (5.4)$$

L'équation (5.3) en repère cartésien devient (5.5) :

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= (\lambda + 2\mu) \varepsilon_{xx} + \lambda \varepsilon_{yy} + \lambda \varepsilon_{zz}, & \sigma_{xy} &= 2\mu \varepsilon_{xy} \\ \sigma_{yy} &= \lambda \varepsilon_{xx} + (\lambda + 2\mu) \varepsilon_{yy} + \lambda \varepsilon_{zz}, & \sigma_{yz} &= 2\mu \varepsilon_{yz} \\ \sigma_{zz} &= \lambda \varepsilon_{xx} + \lambda \varepsilon_{yy} + (\lambda + 2\mu) \varepsilon_{zz}, & \sigma_{zx} &= 2\mu \varepsilon_{zx} \end{aligned} \quad (5.5)$$

Toutes les structures (poutres, bâtiments, dalles de tabliers des ponts, etc.) sont soumises à de nombreuses vibrations.

Nous nous intéresserons particulièrement aux structures de type plaque mince comme des dalles des chaussées ou des dalles de tabliers des ponts pour comprendre la théorie basée sur les vibrations de ces structures, la généralisation des modes propres et l'analyse de la réponse forcée.

### 5.2.1 Vibrations des structures de type plaque mince

Une plaque par définition est un solide dont une dimension appelée épaisseur est supposée petite devant les autres dimensions de la plaque. Il admet un plan de symétrie passant par le milieu de l'épaisseur, appelé feuillet moyen, chargé transversalement. L'épaisseur est toujours dirigée selon l'axe propre de l'élément. Ainsi, du fait de la minceur de la plaque, les hypothèses suivantes sont à considérer [41] :

- Les forces extérieures (forces données et réactions des appuis) peuvent être considérées comme appliquées au plan moyen ;
- La contrainte normale sur tout élément parallèle au plan moyen peut être négligée ;
- Le plan moyen ne subit aucune contraction ni extension lors de la flexion de la plaque.

#### 5.2.1.1 Théorie des plaques

Dans la vibration des plaques, on distingue deux types de mouvements vibratoires élémentaires : les vibrations dans le plan ou vibrations longitudinales et les vibrations transversales. Les vibrations transversales sont les plus observées dans les problèmes rencontrés en pratique [40].

Les vibrations longitudinales sont les plus générées dans les vibrations des poutres, structures élancées. Elles supposent que le déplacement transversal dans la direction  $z$  est nul et par contre dans les directions  $x$  et  $y$ , les déplacements sont constants dans l'épaisseur.

La théorie de vibration des plaques résumée par la théorie Love-Kirchhoff s'applique aux vibrations transversales et ne prend pas en compte le cisaillement transversal. Elle suppose donc que le cisaillement transversal est nul. Elle est donc applicable lorsque le rapport de la plus grande dimension sur l'épaisseur est supérieur à 20 [42] (**Figure 5.5**).

Les relations mathématiques qui suivent tirées de la référence [42] permettent d'établir l'équation de vibrations transversales des plaques minces. La résolution de cette équation aboutit à la détermination des fréquences propres vibratoires. La connaissance des fréquences propres et les différents modes vibratoires d'une plaque, peut être utilisée pour évaluer les paramètres tels que l'épaisseur et la taille de la plaque.

- Relation moments - courbures

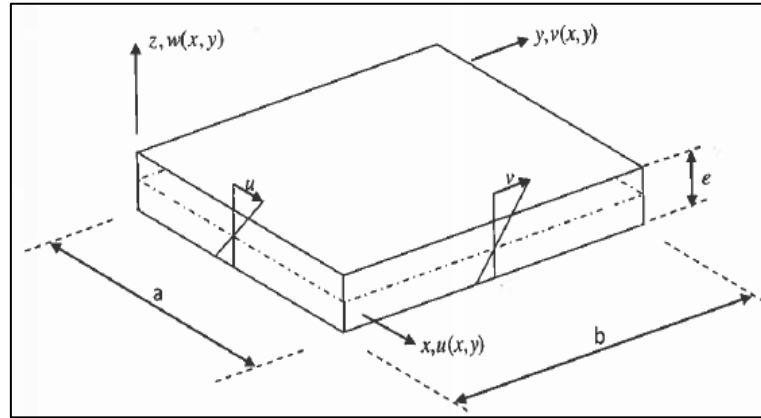


Figure 5.5 : Plaque mince [42].

Les composantes  $(u, v, w)$  du déplacement d'un point de la plaque de coordonnées  $(x, y, z)$  (Figure 5.6) peuvent s'écrire suivant les Équations 5.6 :

$$\begin{aligned} u &= -z \frac{\partial w}{\partial x} \\ v &= -z \frac{\partial w}{\partial y} \end{aligned} \quad (5.6)$$

$$w = w(x, y)$$

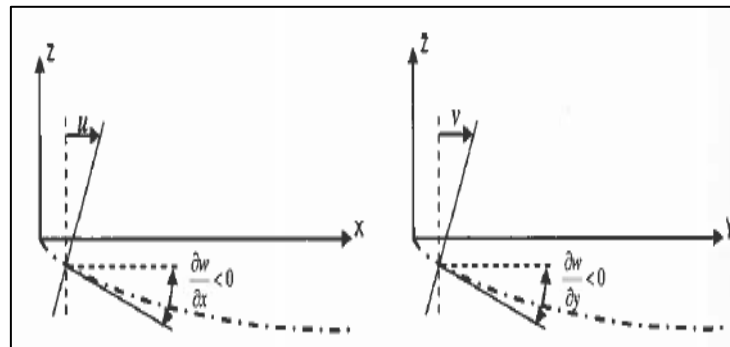


Figure 5.6 : Calcul des déplacements horizontaux [42].

Les seules composantes non nulles du tenseur de déformation en ce point sont donc égales à (Équations 5.7) :

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x} = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\
\varepsilon_{yy} &= \frac{\partial v}{\partial y} = -z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\
\varepsilon_{xy} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}
\end{aligned} \tag{5.7}$$

Les autres composantes de déformation sont nulles (**Équations 5.8**) :

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{zz} &= \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \\
\varepsilon_{yz} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) = 0 \\
\varepsilon_{zx} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) = 0
\end{aligned} \tag{5.8}$$

Les relations de la théorie d'élasticité entre les champs de contraintes et les champs de déformations se résument dans les trois relations suivantes (**Équations 5.9**) dans lesquelles  $E$  est le module de Young et  $\nu$  le coefficient de Poisson :

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{xx} &= \frac{1}{E} (\sigma_{xx} - \nu \sigma_{yy}) \\
\varepsilon_{yy} &= \frac{1}{E} (\sigma_{yy} - \nu \sigma_{xx}) \\
\varepsilon_{xy} &= \frac{1 + \nu}{E} \sigma_{xy}
\end{aligned} \tag{5.9}$$

Ainsi les composantes de contraintes peuvent s'écrire (**Équations 5.10**)



$$\begin{aligned}
\sigma_{xx} &= \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_{xx} + \nu \varepsilon_{yy}) = -\frac{Ez}{1-\nu^2} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \\
\sigma_{yy} &= \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_{yy} + \nu \varepsilon_{xx}) = -\frac{Ez}{1-\nu^2} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \\
\sigma_{xy} &= \frac{E}{1-\nu^2} (1-\nu) \varepsilon_{xy} = -\frac{Ez}{1-\nu^2} (1-\nu) \frac{\partial^2 w}{\partial xy}
\end{aligned} \tag{5.10}$$

- $\sigma_{xx}$  : la contrainte normale suivant l'axe  $x$ ;
- $\sigma_{yy}$  : la contrainte normale suivant l'axe  $y$ ;
- $\sigma_{xy}$  : la contrainte de cisaillement.

Les autres composantes étant nulles :

$\sigma_{zz} = 0$  (Contrainte transversale ou contrainte normale suivant l'axe  $z$ ),  $\sigma_{yz} = 0$  et  $\sigma_{zx} = 0$  (contraintes de cisaillement).

Ainsi, les moments de flexion ou moments fléchissants normaux  $M_{xx}$  et  $M_{yy}$  ainsi que le moment de torsion  $M_{xy}$  ou l'effort tranchant au point du plan moyen de coordonnées  $(x, y)$  sont donnés par l'équation 5.11 :

$$\begin{aligned}
M_{xx} &= - \int_{-\frac{e}{2}}^{\frac{e}{2}} \sigma_{xx} z dz \\
M_{yy} &= - \int_{-\frac{e}{2}}^{\frac{e}{2}} \sigma_{yy} z dz
\end{aligned} \tag{5.11}$$

$$M_{xy} = - \int_{-\frac{e}{2}}^{\frac{e}{2}} \sigma_{xy} z d_z$$

En intégrant les équations **5.10** respectivement dans les équations **5.11**, on aboutit aux équations suivantes **5.12** :

$$\begin{aligned} M_{xx} &= D \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \\ M_{yy} &= D \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \\ M_{xy} &= D(1 - \nu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{aligned} \quad (5.12)$$

Avec :

- D, la rigidité à flexion de la plaque (**5.13**) :

$$D = \frac{E}{1 - \nu^2} \int_{-\frac{e}{2}}^{\frac{e}{2}} z^2 d_z = \frac{E e^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (5.13)$$

e = l'épaisseur de la plaque ;

E= le module de Young

$\nu$ = le coefficient de Poisson

- Les composantes :

$-\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$ ,  $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$  et  $\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$  : définissent la déformation généralisée en un point du

plan moyen.

–  $\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$  : la courbure normale du plan moyen déformé suivant la *direction de l'axe Ox* ;

–  $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$  : la courbure normale du plan moyen déformé suivant la *direction de l'axe Oy*

–  $\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$  : la courbure de torsion suivant les directions des axes.

- **Flexion des plaques sous charges latérales réparties**

L'étude d'une section de la plaque en équilibre (**Figure 5.8**) soumise à une charge répartie  $q$  donne en sommant les forces par rapport à l'axe  $z$  (5.14) :

$$\left(T_x + \frac{\partial T_x}{\partial x} dx\right) dy - T_x dy + \left(T_y + \frac{\partial T_y}{\partial y} dy\right) dx - T_y dx + q dx dy = 0 \quad (5.14)$$

En simplifiant cette équation, celle-ci se résume à (5.15) :

$$\frac{\partial T_x}{\partial x} + \frac{\partial T_y}{\partial y} = -q \quad (5.15)$$

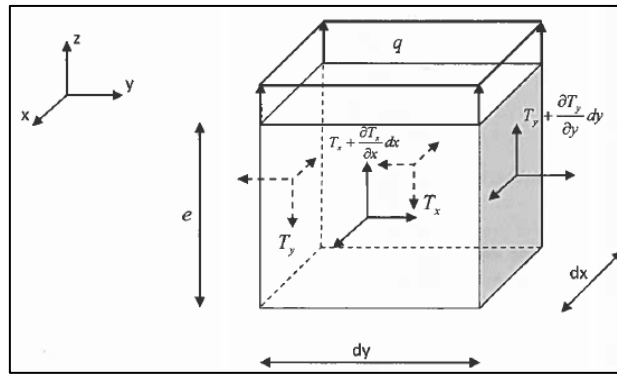


Figure 5.7 : Sommation des forces par rapport à  $z$  [42].

Et en sommant les moments par rapport à l'axe  $y$  (**Figure 5.8**) on obtient (5.16) :

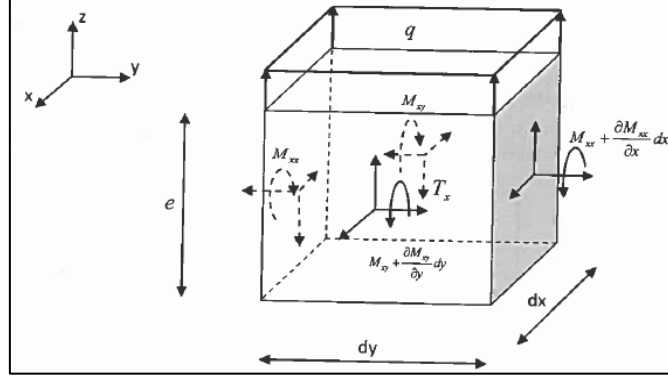


Figure 5.8 : Sommation des moments par rapport à l'axe y [42].

$$\left(M_{xx} + \frac{\partial M_{xx}}{\partial x} dx\right) dy - M_{xx} dy + \left(M_{xy} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} dy\right) dx - M_{xy} dx - T_x dx dy = 0 \quad (5.16)$$

En simplifiant, l'équation (5.16) se résume à (5.17) :

$$\frac{\partial M_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} = T_x \quad (5.17)$$

En étudiant l'équilibre par rapport à l'axe x, on obtient une troisième équation d'équilibre (5.18) :

$$\frac{\partial M_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial M_{yy}}{\partial y} = T_y \quad (5.18)$$

En intégrant les équations 5.17 et 5.18 dans l'équation 5.15, on obtient l'équation (5.19) :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial M_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial M_{yy}}{\partial y} \right) + q = 0 \quad (5.19)$$

En simplifiant cette équation, on obtient (5.20) :

$$\frac{\partial^2 M_{xx}}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_{yy}}{\partial y^2} = -q \quad (5.20)$$

En intégrant ainsi **5.17** et le moment  **$M_{xy}$**  de l'équation **5.12** dans l'équation **5.20**, on aboutit à la deuxième forme de l'équation **5.20** en fonction de  $w$  (**5.21**) :

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{q}{D} \quad (5.21)$$

C'est l'équation de vibrations transversales des plaques minces. **D** est la rigidité de flexion (équation **5.13**).

### 5.2.2 Analyse modale

L'analyse modale d'une structure est la détermination de ses fréquences propres et de la forme des modes de résonance associés. Elle permet d'améliorer la connaissance physique des structures puis, dans un certain sens le comportement : le calcul de la base modale d'une structure est aujourd'hui une étape importante de son dimensionnement. La résolution de l'équation **5.21** selon les conditions aux limites définies conduit aux résultats définissant un schéma modal. Pour chaque couple d'indices (i, j), on associe la pulsation propre dont est déduite la fréquence propre telle qu'exprimée par l'équation **5.22** :

$$\text{Fréquence propre (Hertz)} f_{ij} = \frac{\lambda_{ij}^2}{2\pi a^2} \left[ \frac{E e^3}{12\gamma(1 - \nu^2)} \right]^{1/2} \quad (5.22)$$

Avec :

- $i = 1, 2, 3 \dots; j = 1, 2, 3 \dots$
- $a^2 = a_{def} * b_{def}$  Surface de la plaque
- $a$  = Largeur de la plaque
- $b$  = Longueur de la plaque
- $e$  = Épaisseur de la plaque
- $i$  = Ordre de mode sur l'axe horizontal
- $j$  = Ordre de mode sur l'axe vertical
- $E$  = Module d'élasticité de la plaque
- $\gamma$  = Densité de la plaque
- $\nu$  = Coefficient de Poisson de la plaque

- $\lambda_{ij}^2 = \pi^2 \left[ i^2 + j^2 \left( \frac{a}{b} \right)^2 \right]$ , ce paramètre qui dépend des conditions aux limites de la plaque, des dimensions et des séquences de modes de la plaque.

Par exemple, pour des conditions aux limites de type plaque encastree (Tableau 5.1), les bords du défaut sont fixés en conséquence le déplacement vertical et la rotation y sont nuls. Pour des conditions aux limites de plaque simplement supportée (Tableau 5.2), les déplacements verticaux et la rotation n'y sont pas nuls.

Tableau 5.1 : Fréquences propres, cas d'une plaque encastree

Natural Frequency (hertz), $f_{ij} = \frac{\lambda_{ij}^2}{2\pi a^2} \left[ \frac{Eh^3}{12\gamma(1 - \nu^2)} \right]^{1/2}$ ; $i=1,2,3...; j=1,2,3...$																																																		
Description	$\lambda_{ij}^2$ and (ij)																																																	
1. Clamped-Clamped - Clamped-Clamped	<table> <tr> <th><math>\frac{a}{b}</math></th> <th colspan="6">Mode Sequence</th> </tr> <tr> <th></th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>6</th> </tr> <tr> <td>0.4</td> <td>23.65 (11)</td> <td>27.82 (12)</td> <td>35.45 (13)</td> <td>46.70 (14)</td> <td>61.55 (15)</td> <td>63.10 (21)</td> </tr> <tr> <td>2/3</td> <td>27.01 (11)</td> <td>41.72 (12)</td> <td>66.14 (21)</td> <td>66.55 (13)</td> <td>79.85 (22)</td> <td>100.9 (14)</td> </tr> <tr> <td>1.0</td> <td>35.99 (11)</td> <td>73.41 (21)</td> <td>73.41 (12)</td> <td>108.3 (22)</td> <td>131.6 (31)</td> <td>132.2 (13)</td> </tr> <tr> <td>1.5</td> <td>60.77 (11)</td> <td>93.86 (21)</td> <td>148.8 (12)</td> <td>149.74 (31)</td> <td>179.7 (22)</td> <td>226.9 (41)</td> </tr> <tr> <td>2.5</td> <td>147.80 (11)</td> <td>173.9 (21)</td> <td>221.5 (31)</td> <td>291.9 (41)</td> <td>384.7 (51)</td> <td>394.4 (12)</td> </tr> </table>	$\frac{a}{b}$	Mode Sequence							1	2	3	4	5	6	0.4	23.65 (11)	27.82 (12)	35.45 (13)	46.70 (14)	61.55 (15)	63.10 (21)	2/3	27.01 (11)	41.72 (12)	66.14 (21)	66.55 (13)	79.85 (22)	100.9 (14)	1.0	35.99 (11)	73.41 (21)	73.41 (12)	108.3 (22)	131.6 (31)	132.2 (13)	1.5	60.77 (11)	93.86 (21)	148.8 (12)	149.74 (31)	179.7 (22)	226.9 (41)	2.5	147.80 (11)	173.9 (21)	221.5 (31)	291.9 (41)	384.7 (51)	394.4 (12)
$\frac{a}{b}$	Mode Sequence																																																	
	1	2	3	4	5	6																																												
0.4	23.65 (11)	27.82 (12)	35.45 (13)	46.70 (14)	61.55 (15)	63.10 (21)																																												
2/3	27.01 (11)	41.72 (12)	66.14 (21)	66.55 (13)	79.85 (22)	100.9 (14)																																												
1.0	35.99 (11)	73.41 (21)	73.41 (12)	108.3 (22)	131.6 (31)	132.2 (13)																																												
1.5	60.77 (11)	93.86 (21)	148.8 (12)	149.74 (31)	179.7 (22)	226.9 (41)																																												
2.5	147.80 (11)	173.9 (21)	221.5 (31)	291.9 (41)	384.7 (51)	394.4 (12)																																												
$\lambda$ is independent of $\nu$ .																																																		

Tableau 5.2 : Fréquences propres, cas d'une plaque simplement supportée.

$$\text{Natural Frequency (hertz), } f_{ij} = \frac{\lambda_{ij}^2}{2\pi a^2} \left[ \frac{Eh^3}{12\gamma(1-\nu^2)} \right]^{1/2}; \quad i=1,2,3\dots; \quad j=1,2,3\dots$$

Description

16. Simply Supported-Simply Supported - Simply Supported-Simply Supported

$\lambda_{ij}^2$  and (ij)

$\frac{a}{b}$	Mode Sequence					
	1	2	3	4	5	6
0.4	11.45 (11)	16.19 (12)	24.08 (13)	35.14 (14)	41.06 (21)	45.8 (22)
2/3	14.26 (11)	27.42 (12)	43.86 (21)	49.35 (13)	57.02 (22)	78.9 (23)
1.0	19.74 (11)	49.35 (21)	49.35 (12)	78.96 (22)	98.70 (31)	98.7 (13)
1.5	32.08 (11)	61.69 (21)	98.70 (12)	111.0 (31)	128.30 (22)	177.7 (32)
2.5	71.56 (11)	101.16 (21)	150.5 (31)	219.6 (41)	256.6 (12)	286.2 (22)

$$\lambda_{ij}^2 = \pi^2 \left[ i^2 + j^2 \left( \frac{a}{b} \right)^2 \right]$$

Les **Figures 5.9** et **5.10** présentent des exemples de schéma modal d'une plaque simplement supportée. Les modes sont définis par un double indice, relatif aux directions et respectivement sur l'axe horizontal de la plaque et sur l'axe vertical de la plaque. La **Figure 5.9** présente une déformée propre du mode (1, 1) d'une plaque rectangulaire simplement supportée. Ici, tous les points de la plaque vibrent en phase [40]. La **Figure 5.10** présente une déformée propre du mode (2, 1) d'une plaque rectangulaire simplement supportée. C'est le deuxième mode en fréquence si  $a > b$ . Ce mode présente une ligne nodale pour  $x_1 = a/2$ . Les vibrations s'effectuent en opposition de phase de part et d'autre de la ligne nodale [40].

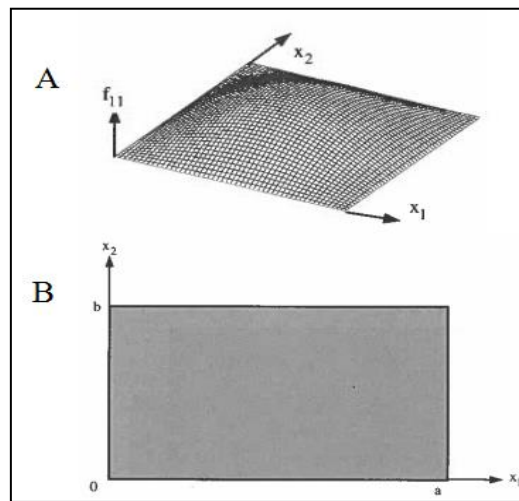


Figure 5.9 : Déformée propre du mode (1, 1), A - Image tridimensionnelle, B – Représentation par le tracé des lignes nodales (aucune pour ce mode) [40].

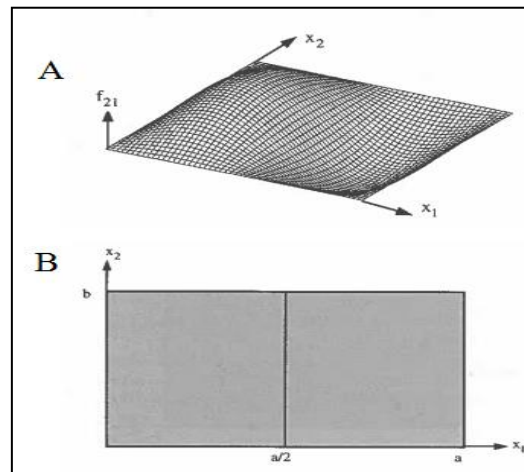


Figure 5.10 : Déformée propre du mode (2, 1), A - Image tridimensionnelle, B – Représentation par le tracé des lignes nodales [40].

### 5.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la physique basée sur la propagation des ondes acoustiques d'une part et la théorie basée sur la vibration des plaques minces. Nous avons vu que la résolution de l'équation fondamentale de la vibration des plaques minces (**Équation 5.21**) conduit aux résultats de l'équation permettant de définir la pulsation propre et donc la fréquence propre d'une plaque (**Équation 5.22**). Nous avons vu également que les plaques vibrent ainsi selon plusieurs modes. Nous allons ainsi essayer d'utiliser l'équation **5.22** pour voir s'il est possible de caractériser les paramètres tels que la profondeur et le diamètre d'un défaut sous une dalle en vibration connaissant ses modes et ses fréquences propres, déterminés à partir des études numériques (analyse modale) et expérimentales (analyse de la réponse forcée).



**PARTIE B : MÉTHODOLOGIE –  
PROGRAMME NUMÉRIQUE – PROGRAMME  
EXPÉRIMENTAL - RÉSULTATS**

# CHAPITRE 6

## L'APPROCHE DÉVELOPPÉE POUR LE TRAITEMENT ET L'ANALYSE DES DONNÉES DE LA RI

Ce chapitre présente la démarche d'élaboration de l'approche développée. En effet, en nous basant sur l'analyse des courbes de mobilité spectrale issues de la revue bibliographique (**Figures 4.4, 4.5, 4.6, 4.7**), nous avons voulu comprendre si parmi les différentes fréquences de résonance de vibration obtenues sur une gamme de fréquences donnée, il était possible de déterminer et de dissocier les fréquences propres. Il s'agit des fréquences propres associées aux modes de vibrations globaux de la dalle et les fréquences propres qui seraient associées aux modes de vibrations locaux c'est-à-dire les modes qui concernent uniquement la vibration du défaut dans le cas de la perte de l'adhérence entre deux dalles. En partant de cette hypothèse, une approche d'analyse des données de la RI a été développée en se basant sur l'étude modale et sur l'étude de la réponse forcée ou de la RI.

### 6.1 Mise en place et méthodologie de l'approche développée

L'approche proposée vise à définir les paramètres d'évaluation d'un système d'inspection acoustique entre deux dalles de béton. L'objectif visé est de développer un outil de traitement des données de la RI capable de détecter spatialement et de caractériser les paramètres du défaut, principalement le diamètre et la profondeur.

Pour évaluer la taille et la profondeur du défaut, nous sommes partis de l'hypothèse qu'un défaut dans une dalle (**Figure 6.1**) vibre indépendamment de l'ensemble de la dalle. La vibration du défaut serait directement associée à la vibration de l'épaisseur de la dalle située au-dessus du défaut. Cette épaisseur  $e_{def}$  constituerait donc une plaque mince à part entière.

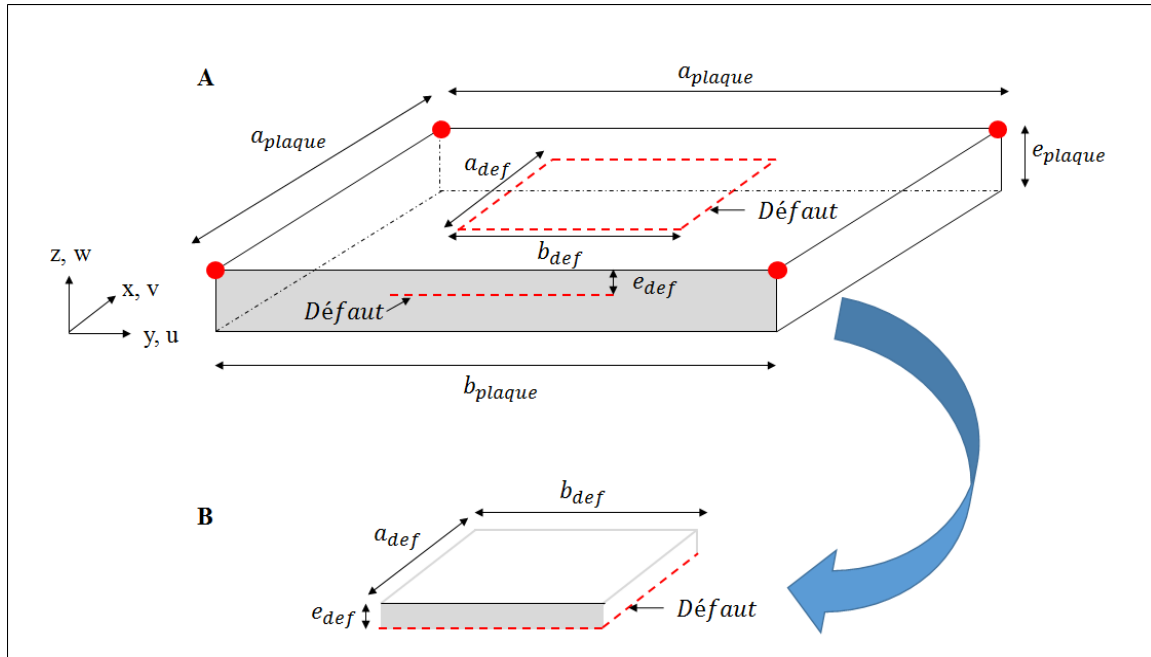


Figure 6.1 : A - Schématisation d'une plaque constituée d'un défaut, B – Plaque mince vibrante constituée du défaut à sa base.

Connaissant la fréquence de vibration de cette plaque mince  $f_{ij}$ , on applique l'équation fondamentale (**Équation 6.1**) de vibration mécanique en flexion pour déduire l'épaisseur ou la profondeur  $e_{def}$  de la plaque telle que :

$$f_{ij} = \frac{\lambda_{ij}^2}{2\pi A} \left[ \frac{E(e_{def})^3}{12\gamma(1-\nu^2)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6.1)$$

Avec :

- $i = 1, 2, 3 \dots; j = 1, 2, 3 \dots$
- $A = a_{def} \cdot b_{def}$  Surface de la plaque
- $a_{def}$  = Largeur de la plaque
- $b_{def}$  = Longueur de la plaque
- $e_{def}$  = Épaisseur de la plaque
- $i$  = Numéro de mode sur l'axe horizontal
- $j$  = Numéro de mode sur l'axe vertical

- $E$  = Module d'élasticité de la plaque
- $\gamma$  = Densité de la plaque
- $\nu$  = Coefficient de Poisson de la plaque
- $\lambda_{ij}^2 = \pi^2 \left[ i^2 + j^2 \left( \frac{a}{b} \right)^2 \right]$ . Ce paramètre dépend des conditions aux limites de la plaque, des dimensions et des séquences de modes de la plaque (**Tableaux 5.1 et 5.2**).

On considère que les autres paramètres de la structure sont connus : le module d'élasticité  $E$ , la densité  $\gamma$ , le coefficient de Poisson  $\nu$ , la surface du défaut  $A$  (directement déterminée sur la cartographie).

Nous considérerons également deux cas de conditions aux limites. On supposera le cas d'une vibration en flexion d'une plaque encastree pour tous les bords et le cas d'une plaque simplement supportee sur les quatre cotes pour les defauts de forme carree ou rectangulaire.

Considerant un modele de plaque encastree pour un defaut donne, les bords de la plaque sont fixes, en consequence le deplacement vertical et la rotation sont nuls. Ce cas donnerait des informations sur le calcul de la profondeur maximale du defaut, car la plaque et par consequent le defaut vibre faiblement. C'est le cas le plus realiste pour l'evaluation de la profondeur des defauts dans les dalles, car on suppose que les deplacements verticaux et les rotations sont nuls. Considerant un modele de plaque simplement supportee pour un defaut donne, les deplacements verticaux et la rotation ne sont pas nuls. Ce cas donnerait des informations sur la profondeur minimale du defaut, car la plaque et par consequent le defaut est suppose vibrer avec de fortes amplitudes.

Pour simplifier l'analyse de l'approche a developper, nous allons considerer a priori le calcul de la profondeur ou de l'epaisseur de la plaque en nous basant sur des defauts de dimensions carrees dont le rapport  $a/b = 1$  et ayant des frequences propres correspondant au premier mode vibration du defaut c'est-a-dire les modes  $m$  (1,1) (**Tableaux 5.1 et 5.2**).

Les **Tableaux 5.1 et 5.2** decrivent les conditions aux limites des plaques definies en fonction des dimensions des plaques et des sequences des modes des plaques.

➤ **Évaluation de la taille du défaut.**

Le diamètre ou la surface du défaut sera directement évalué à partir des cartographies de mobilités établies correspondant à la fréquence propre associée à la vibration locale de ce défaut en comptant simplement le nombre de pixels présents sur ces cartographies.

➤ **Évaluation de la profondeur du défaut.**

Connaissant donc la fréquence propre du défaut  $f_{ij}$  et sa surface  $A$ , on peut alors déduire sa profondeur  $e_{def}$ , à partir de l'équation 6.1. La profondeur  $e_{def}$  recherchée donc égale à l'équation 6.2 :

$$e_{def} = \left( \frac{(2\pi)^2 12\gamma A^2 (1 - \nu^2) f_{ij}^2}{\lambda_{ij}^4 E} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6.2)$$

Par rapport aux conditions aux frontières des plaques définies, on calcule la profondeur minimale, en supposant le cas d'une plaque encastree et la profondeur maximale pour le cas d'une plaque simplement supportee (**Tableaux 5.1 et 5.2**). Si l'on considere que le défaut est une plaque de forme carrée c'est-à-dire vibrant selon le premier mode de deformation m (1,1), alors la valeur de  $\lambda_{ij}^2 = 19,74$ . Cette valeur sera utilisée pour le calcul de la profondeur dans le cas d'une plaque simplement supportee. Dans le cas d'une plaque (défaut) supposée encastree si on considere que le défaut est de forme carrée, c'est-à-dire que  $a = b$  vibrant selon le premier mode de deformation m (1,1), alors la valeur de  $\lambda_{ij}^2 = 35,99$ . Cette valeur sera utilisée pour le calcul de la profondeur.

## 6.2 Description de l'approche d'analyse développée

Le programme d'analyse est résumé en cinq principales étapes (**Figure 6.2**). La description détaillée de l'approche sous forme schématique se trouve à l'**annexe D**.

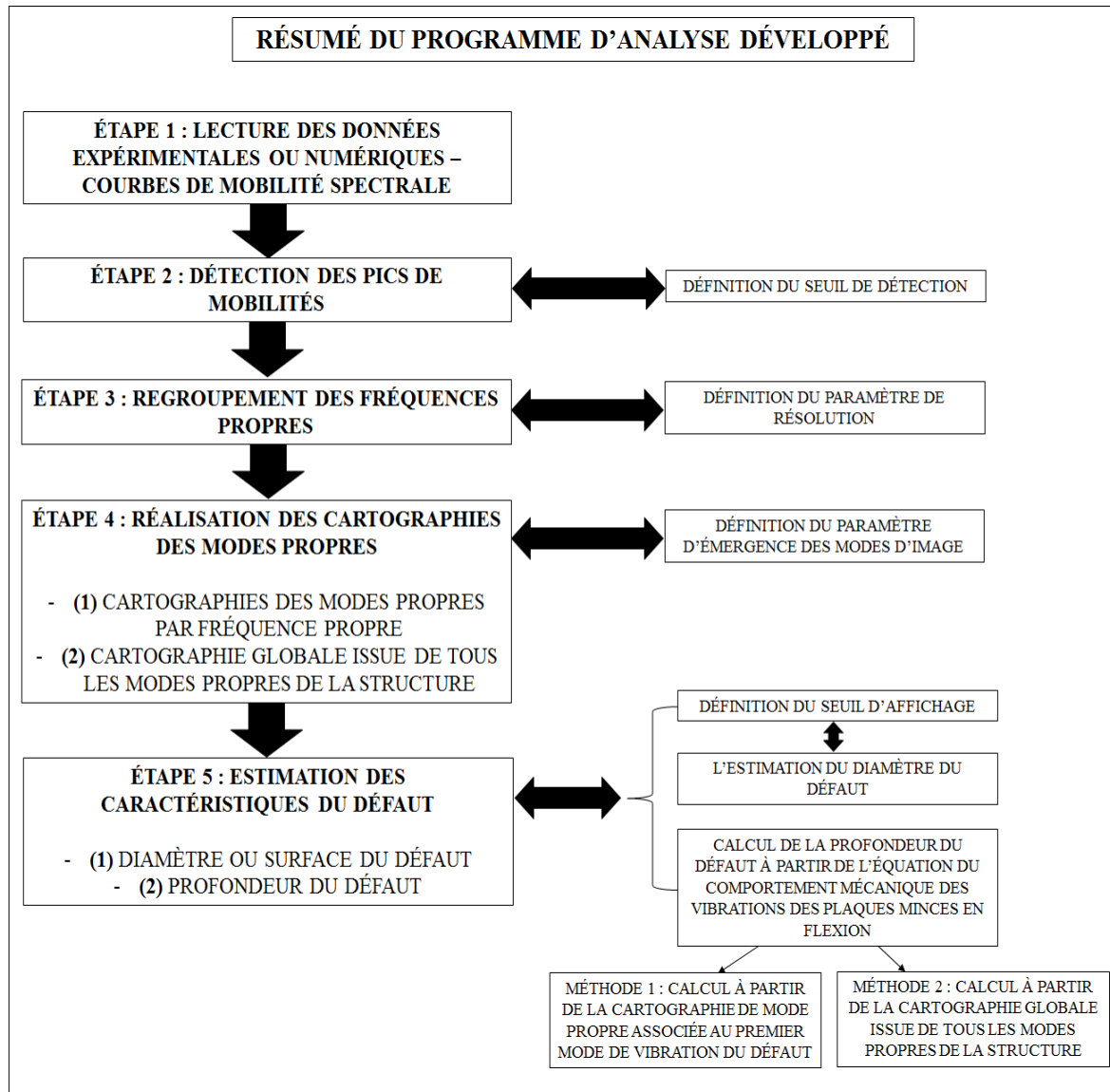


Figure 6.2 : Schéma de synthèse du programme d'analyse

L'approche développée consiste à :

- Implanter une approche d'analyse à travers un programme informatique développé sur Matlab à partir des données de la RI issues de chaque point de mesure de la structure ;
- Définir les paramètres d'analyses ;

- Exploiter le programme pour séparer sur des courbes de mobilité spectrale les **modes de vibrations globaux** (associés à la structure) des **modes locaux** (associés aux défauts) afin d'extraire les déformées modales associées aux modes de résonance du défaut.
- Élaborer les cartographies. Les résultats attendus sont les cartographies de détection et de l'estimation des paramètres du défaut, construites à partir des différents modes et fréquences propres de vibration.
- Estimer les paramètres des défauts (taille et profondeur). Les cartographies donnent des informations sur l'étendue ou la surface du défaut. Connaissant la fréquence propre associée au premier mode de vibration du défaut, on est en mesure d'estimer la profondeur du défaut sous l'hypothèse de vibration en flexion de plaques minces.

Considérons une structure à ausculter caractérisée par un défaut (**Figure 6.3**), les mesures de la RI sur l'ensemble de la structure sont faites point par point suivant un pas de mesure bien défini. Dans le cas de l'exemple de la figure 6.3, au total 153 points (9X17) de mesure sont donc effectués.

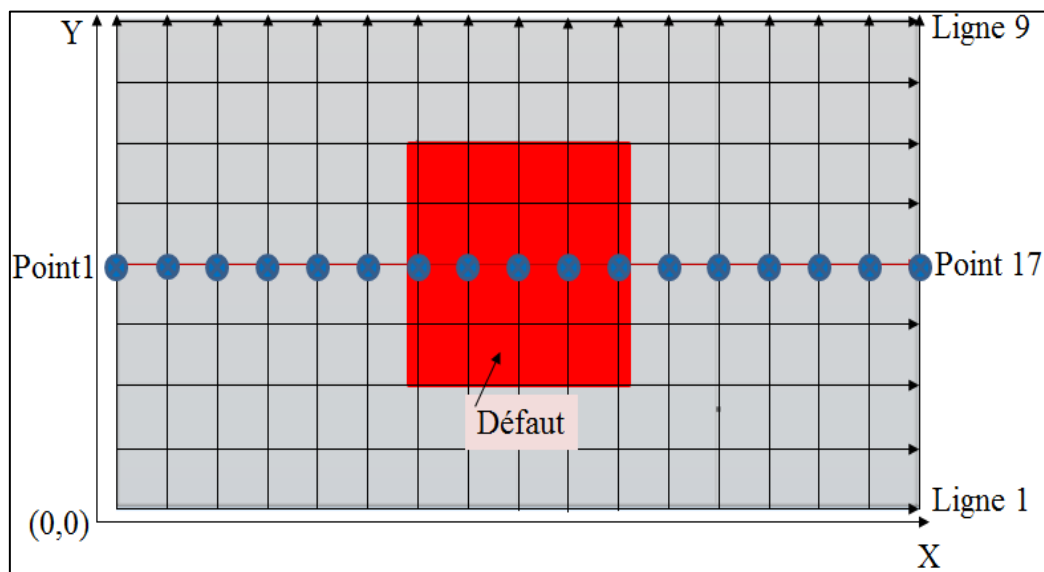


Figure 6.3 : Configuration de mesures RI dans une structure.

Le traitement et l'analyse des données sont faits selon les étapes suivantes :

- Lecture des données numériques ou expérimentales, point de mesure par point de mesure ;

- Détection des pics de mobilités sur toutes les courbes de mobilité spectrale et définition d'un seuil de détection de ces pics ;
- Regroupement des fréquences propres semblables issues de toutes les courbes de mobilité obtenues à chaque point de mesure de la structure à ausculter et définition du paramètre de résolution ;
- Réalisation des cartographies des modes propres (modes globaux et locaux) et définition du paramètre d'émergence des modes propres ;
- Estimation des caractéristiques du défaut à partir des modes locaux et définition du paramètre de seuil d'affichage d'images.

➤ **Étape 1 : Lecture des données numériques ou expérimentales : Courbes de mobilité spectrale**

Le programme informatique permet la lecture des fichiers des données de la RI numériques ou expérimentales enregistrés sous format CSV et l'affichage des courbes de mobilité spectrale. Exemples des données :

- Les données numériques exportées du logiciel d'éléments finis **COMSOL Multiphysics** sont dans un fichier contenant trois colonnes, dont une colonne des coordonnées spatiales au point de mesure (xF), une colonne de fréquences de vibration et une colonne des mobilités spectrales exprimées par le rapport entre les vitesses vibratoires et la force dynamique appliquée (**Tableau 6.1**).



Tableau 6.1 : Extrait des données numériques de la RI – Mobilités spectrales en fonction de la fréquence.

xF	Fréquence (Hz)	Mobilité (m/s.N)
0	0	0
0	10	7,11E-07
0	20	1,56E-06
0	30	2,94E-06
0	40	9,11E-06
0	50	2,98E-06
0	60	5,09E-07
0	70	1,81E-06
0	80	2,84E-06
0	90	3,88E-06
0	100	5,08E-06
0	110	6,60E-06
0	120	8,74E-06
0	130	1,21E-05
0	140	1,86E-05
0	150	3,79E-05
0	160	1,39E-04
0	170	3,28E-05
0	180	1,18E-05
0	190	3,13E-05
0	200	1,29E-05
0	210	8,27E-06

- Les données expérimentales générées au moyen du système d'acquisition **HS4 Multichannel** sont constituées de deux fichiers, un fichier contenant des informations sur les fréquences vibratoires et la force appliquée (**Tableau 6.2, A**) et un fichier contenant des informations sur les fréquences vibratoires et les vitesses vibratoires (**Tableau 6.2, B**).

Les données étant en volts, le programme Matlab utilise les différents facteurs de sensibilité de la source (marteau muni du capteur de force) et du capteur (géophone) puis convertit les volts (V) en unités internationales, respectivement en Newton (N) pour la force et en m/s pour les vitesses vibratoires. Une fois les données converties, le calcul des mobilités est effectué en utilisant les deux fichiers puis en appliquant le rapport entre les vitesses vibratoires et la force appliquée à chaque fréquence. Un prétraitement de filtrage passe-bas peut être envisagé pour supprimer les hautes fréquences lorsque les données sont assez bruitées du fait des conditions de mesures non maîtrisées dans le cas des mesures expérimentales sur chantier.

Tableau 6.2 : Extrait des données expérimentales de la RI – Force (V) en fonction de la fréquence (Hz) (Tableau 6.2, A), Vitesses vibratoires (V) en fonction de la fréquence (HZ) (Tableau 6.2, B).

(A)			(B)		
Sample number	Frequency	FFT2	Sample number	Frequency	FFT1
	Hz	V		Hz	V
0	0	0,004173	0	0	0,1993262
1	10,130316	0,0005047	1	10,130316	0,0013476
2	20,260633	0,0009295	2	20,260633	0,0013476
3	30,390949	0,0030276	3	30,390949	0,0013476
4	40,521266	0,0066009	4	40,521266	0,0013475
5	50,651582	0,0054045	5	50,651582	0,0013474
6	60,781898	0,0037338	6	60,781898	0,0013473
7	70,912215	0,0025619	7	70,912215	0,0013471
8	81,042531	0,001926	8	81,042531	0,001347
9	91,172848	0,0015893	9	91,172848	0,0013468
10	101,30316	0,0013509	10	101,30316	0,0013466
11	111,43348	0,0011647	11	111,43348	0,0013464
12	121,5638	0,0010218	12	121,5638	0,0013461

### ➤ Étape 2 : Détection des pics de mobilités

Cette étape consiste à :

- **Définir** un seuil de détection des pics ;
- **Détecter** les pics de mobilité sur toutes les courbes de mobilité spectrale associés à chaque point d'impact sur la structure à ausculter.

Le seuil de détection est un seuil absolu défini en fixant une certaine valeur de la mobilité. Il doit être à priori fixé à une valeur qui correspond à epsilon (eps), c'est-à-dire une valeur infinitésimale proche de zéro. Le fait d'avoir une valeur égale epsilon permet de détecter et de prendre en considération tous les pics de mobilité sur une courbe de mobilité spectrale, y compris donc les pics de très faible amplitude. Un seuil de détection trop élevé peut faire l'impasse sur la détection des pics de mobilité notamment les pics de faible amplitude associés à la vibration du défaut correspondant généralement aux points d'impact situés à l'extérieur de

la zone maximale (centre du défaut) de mobilité du défaut. Le fait d'avoir un seuil aussi faible permet donc d'augmenter la résolution du défaut en termes de détection.

### ➤ Étape 3 : Regroupement des fréquences propres

Cette étape consiste à :

- Définir un paramètre dit « **facteur de résolution** ». Ce paramètre dépend du pas fréquentiel ou pas d'échantillonnage du signal. La définition du paramètre de résolution consiste à ré-échantillonner le signal sur l'axe des fréquences afin d'identifier toutes les fréquences de vibration correspondant aux différents modes de vibration sur les courbes de mobilité spectrale.

Le pas fréquentiel est défini comme le rapport entre l'étendue fréquentielle signal et le nombre d'échantillons de signal, tel que (**équation 6.3**) :

$$\text{Pas fréquentiel (Hz)} = \frac{\text{étendue fréquentielle du signal (Hz)}}{\text{Nombre d'échantillons du signal}} \quad (6.3)$$

Un pas fréquentiel faible augmente le facteur de résolution.

- **Lister** pour chaque point d'impact, toutes les fréquences propres du signal correspondant aux modes de vibration.
- **Interpoler** les fréquences propres proches. En effet dans un pas d'échantillonnage défini, il peut y avoir plus d'une fréquence de vibration (une ou deux ou trois, etc.). Le but de l'opération d'interpolation est de considérer qu'une seule fréquence par pas d'échantillonnage, à priori la fréquence associée au mode de vibration de plus grande amplitude. On privilégie de conserver les modes de forte amplitude au détriment des modes de faible amplitude, car on suppose que ces modes peuvent être associés à la vibration des défauts même si tel n'est pas souvent le cas.

Pour éviter alors de sous-estimer ou de supprimer certains modes par interpolation notamment les modes de faible amplitude qui peuvent être associés à la vibration de défaut et d'augmenter la résolution en termes de détection, il serait recommandé de

définir un pas fréquentiel le plus faible possible qui identifie tous les modes de vibration et donc toutes les fréquences propres sur une courbe de mobilité spectrale.

- **Regrouper** ou **assembler** les fréquences propres semblables issues de toutes les courbes de mobilité obtenues à chaque point de mesure de la structure à ausculter.
- **Trier** les modes propres associés à la vibration des défauts et des modes associés à la vibration globale de la dalle en fonction de leurs fréquences propres respectives.

#### ➤ **Étape 4 : Réalisation des cartographies des modes propres**

Cette étape consiste à :

- **Définir** un paramètre dit paramètre d'émergence. Ce paramètre permet d'émerger ou d'afficher les différents modes de vibration en fonction de la mobilité associée à chaque fréquence de vibration. Le paramètre d'émergence est un paramètre multiplicateur, un nombre réel qui définit l'écart entre la mobilité associée à une fréquence propre de résonance et la mobilité moyenne de la courbe de mobilité spectrale en un point donné. La valeur de ce paramètre est appliquée à toutes les fréquences propres de la courbe de mobilité. C'est un paramètre essentiel dans le traitement des données, car c'est ce paramètre qui permet d'établir les cartographies des modes. Ainsi plus la valeur définie diminue, plus les modes de vibration apparaissent ou émergent en fonction de leurs mobilités respectives.
- **Réaliser** les cartographies de mobilité à partir des modes de vibration qui émergent en fonction de la valeur du paramètre d'émergence définie. Les cartographies établies sont des cartographies de mobilité associées à la vibration de chaque fréquence propre. Ces cartographies représentent des modes de vibrations globaux et les modes de vibration locaux. C'est à partir des cartographies locales que l'estimation du diamètre et de la profondeur du défaut est réalisée.

- **Réaliser** une cartographie de vibration globale de la dalle ou image totale qui résulte de la sommation de tous les modes de vibration de la structure (modes globaux + modes locaux).

➤ **Étape 5 : Estimation des paramètres du défaut : Diamètre et profondeur**

Cette étape consiste à :

- **Définir** un paramètre de seuil de mobilité d’affichage d’image. Ce paramètre permet de dissocier les modes de vibration des défauts des modes associés à la vibration globale et d’afficher à priori les modes locaux notamment le mode local de premier ordre. Si l’on considère une structure avec un défaut, le seuil de mobilité d’affichage d’image doit être à priori fixé à une valeur de mobilité correspondant à zéro (seuil absolu). Cela signifie que les mobilités situées au-dessus de zéro correspondraient aux mobilités associées au défaut. Les parties de la structure ayant des mobilités nulles correspondraient aux parties saines. Cependant, pour avoir une meilleure résolution du diamètre du défaut, on peut choisir un seuil d’image supérieur à zéro, qui prendrait uniquement en compte que la mobilité maximale correspondant à la mobilité du défaut.
- **Estimer** le diamètre ou la surface du défaut. Le paramètre de seuil de mobilité d’affichage d’image permet ainsi d’estimer le diamètre ou la surface du défaut à partir des cartographies de vibration en comptant simplement le nombre de pixels dans une cartographie. Ainsi, la surface totale du défaut est obtenue en multipliant le nombre de pixels sur la cartographie par la surface d’un pixel.
- **Estimer** la profondeur du défaut. L’estimation de la profondeur du défaut est faite selon deux approches proposées :
  - **La première approche** consiste à utiliser les cartographies de vibration locale où seul le défaut vibre principalement le premier mode de vibration du défaut afin de valider l’hypothèse formulée en utilisant l’équation de vibration des plaques minces

(*Équation 6.1*) qui permet de calculer ou d'estimer la profondeur connaissant la fréquence de vibration locale du défaut et la surface du défaut.

- **La deuxième approche** d'évaluation de la profondeur du défaut consiste à utiliser la cartographie de vibration globale de la dalle ou image totale qui résulte de la sommation de tous les modes de vibration de la structure (modes globaux + modes locaux). La cartographie de vibration totale donne plus de détails notamment par rapport à l'étendue du défaut ou à la surface du défaut. La résolution du défaut en termes de détection est grande surtout lorsque seul le défaut vibre. D'où l'idée de son exploitation pour l'évaluation de la profondeur. Ainsi, l'approche consiste à calculer la corrélation spatiale de chaque cartographie obtenue fréquence propre par fréquence propre par rapport à la cartographie totale où seul le défaut vibre. La corrélation est déterminée en faisant le rapport entre le nombre de pixels de chaque cartographie obtenue fréquence propre par fréquence propre par le nombre de pixels de la cartographie totale :
- On définit un seuil d'affichage. Un seuil dont la valeur est supérieure à 50 % permet d'afficher les cartographies ayant une corrélation forte (50% - 60 %), à plus forte (supérieure à 80 %) ou parfaite (100%) par rapport à la cartographie globale.
- Puis on affiche uniquement les cartographies fortement corrélées spatialement à la cartographie globale dont les fréquences propres sont proches de la fréquence propre de vibration du défaut.
- L'estimation de la profondeur du défaut est réalisée en utilisant toujours l'**équation 6.1** connaissant la fréquence propre et la surface soit de l'image ayant le coefficient de corrélation le plus élevé c'est-à-dire celle à priori correspondante à la fréquence propre du défaut, soit de l'image moyenne obtenue en moyennant toutes les cartographies de corrélation dont les fréquences propres sont proches de la fréquence de vibration du défaut.

## 6.3 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la démarche d'élaboration de l'approche développée ainsi que les différentes étapes de sa mise en place. L'approche proposée vise à développer un outil de traitement des données RI capable de détecter et de caractériser les paramètres du défaut principalement la taille et profondeur des défauts. L'approche développée repose sur l'élaboration des cartographies des modes de vibration. Ces cartographies donnent des informations sur la détection et l'estimation des paramètres des défauts. L'approche dépend fortement du choix des paramètres d'analyse définis dans ce programme, à savoir le seuil de détection des pics des mobilités, le paramètre de résolution, le seuil d'affichage d'image et le paramètre d'émergence d'image. Parmi ces quatre paramètres, il a été observé que le paramètre d'émergence joue un rôle déterminant dans l'élaboration des cartographies.

# CHAPITRE 7

## VALIDATION NUMÉRIQUE DE L'APPROCHE DÉVELOPPÉE

Ce chapitre décrit la mise en œuvre du programme de validation numérique de l'approche développée. En effet, le volet de simulation numérique a été développé afin d'acquérir une meilleure connaissance sur la propagation des ondes acoustiques et les phénomènes de mécanique vibratoire dans les dalles de béton et acquérir une meilleure compréhension de la sensibilité des ondes acoustiques aux défauts d'interface.

### 7.1 Mise en œuvre du modèle numérique

L'étude de validation est basée sur l'analyse modale et sur l'analyse de la réponse forcée ou de la réponse impulsionnelle en utilisant un programme de modélisation par éléments finis (**COMSOL Multiphysics**) afin d'identifier clairement les modes associés à la vibration globale de la dalle et ceux associés à la vibration locale du défaut.

**COMSOL Multiphysics** est un logiciel de simulation numérique dont la résolution des problèmes se fait par la méthode des éléments finis. C'est un logiciel performant qui permet de simuler de nombreux phénomènes physiques complexes dont la propagation des ondes mécaniques ou acoustiques et la vibration des plaques.

#### 7.1.1 Modélisation par éléments finis

Les étapes de mise en conception d'un modèle numérique réaliste pour l'étude modale et de la réponse forcée à partir de **COMSOL Multiphysics** sont les suivantes :

- **Définition du domaine d'étude**

C'est la première étape du programme. Pour avoir une meilleure précision sur les résultats et les analyses de simulation numérique des structures volumiques (complexes) telles que les dalles



de béton, nous avons opté pour une simulation tridimensionnelle 3D plutôt que bidimensionnelle 2D (cas des coques ou membranes) ou unidimensionnelle 1D (cas des barres ou poutres).

- **Le choix de la physique (choix du module acoustique ou mécanique structurale pour simuler la vibration mécanique ou la propagation des ondes acoustiques)**

C'est la deuxième étape. Pour réaliser l'étude modale et celle de la réponse forcée, nous avons utilisé la physique consacrée à l'étude de la mécanique structurale, « **Structural Mechanics Module** ». Le module permet ainsi de modéliser et de simuler des applications dans les domaines de la mécanique structurale et du solide. La mécanique structurale a été le premier champ d'application en ingénierie à utiliser le concept de simulation par éléments finis comme outil standard de modélisation. Les simulations avaient ainsi pour objectifs de substituer les résultats aux mesures expérimentales. Le module est ainsi très prisé par les scientifiques et les ingénieurs pour la conception des nouvelles structures et l'étude de la performance de structure existante dans les secteurs tels que la géomécanique des structures aérospatiales, aéronautiques ou en génie civil.

L'avantage de ce module est qu'il peut modéliser des systèmes en domaines statiques et dynamiques en 2D ou 3D. Les modèles des matériaux comprennent les descriptions linéaires, tels que les modèles des matériaux élastiques linéaires et viscoélastiques. En plus des capacités requises en mécanique des structures, le module possède des capacités multi-physiques et peut être appliqué pour des simulations dans les domaines tels que l'acoustique, le transfert de chaleur ou la mécanique des fluides.

- **Définition des paramètres analytiques**

Les paramètres définis sont les dimensions (longueur, largeur, épaisseur) de la structure à modéliser, les dimensions des défauts ou des supports, les propriétés mécaniques des structures (module d'élasticité, coefficient de Poisson, la densité, la vitesse de propagation des ondes acoustiques).

- **Définition de la géométrie de la structure à modéliser (dimensions : longueur, largeur, épaisseur, etc.)**

La géométrie des structures (construction du modèle de la dalle, construction des supports de la dalle, définition de la géométrie de la source d'impact ou du capteur) est faite manuellement à partir des outils géométriques (point, ligne, triangle, rectangle, cercle, cylindre, etc.) (**Figure 7.1**). Des opérations booléennes (additions, soustraction) peuvent être utilisées pour insérer notamment un défaut (vide) dans un modèle dalle de béton. Pour représenter une source ou un point d'un impact, on définit un point ou une sphère de dimensions (diamètre) similaires à l'embout de la source (marteau d'impact) utilisée expérimentalement.

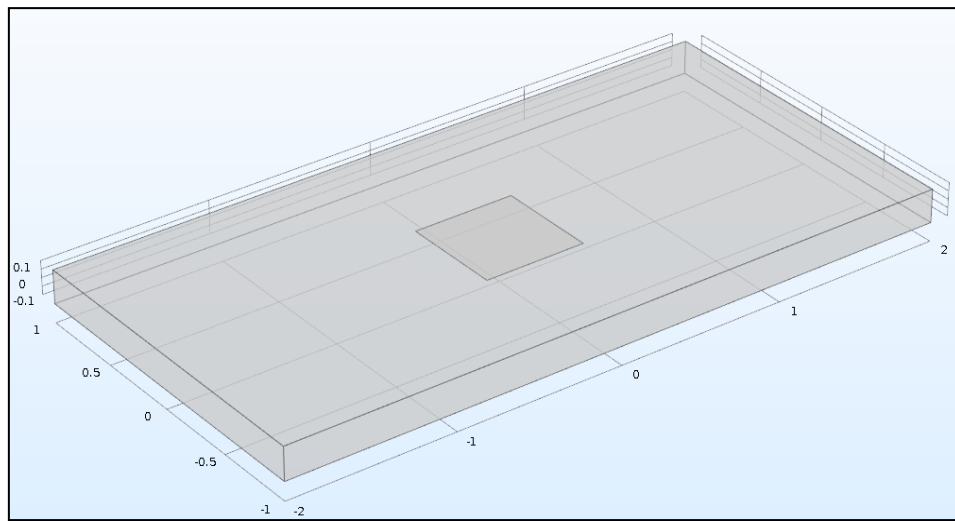


Figure 7.1 : Modèle numérique - Plaque rectangulaire avec un défaut au centre.

- **Définition des propriétés des matériaux**

Parmi les propriétés des matériaux essentielles à la modélisation des structures mécaniques par éléments finis, il y a : le module d'élasticité, la densité ou masse volumique et le coefficient de Poisson des matériaux. En plus des propriétés précitées, la vitesse de propagation des ondes acoustiques dans les matériaux est utilisée dans le cas du choix de la physique du module acoustique. Les propriétés mécaniques des principaux matériaux utilisés sont consignées dans le **Tableau 7.1**.

Tableau 7.1 : Propriétés mécaniques des matériaux.

Propriétés	Polyéthylène	Air	Béton	Acier de construction
Coefficient de Poisson	0,4	-	0,2	0,29
Module d'élasticité (GPa)	0.15	$1,01^{-4}$	10 20 20 – 50 30 50	200
Masse volumique (kg/m3)	953	1.2	2000 2400 2500	7800
Vitesse des ondes acoustiques (m/s)	-	340	4000	5900

- **Définition du maillage**

La définition du maillage est un paramètre important pour la précision des résultats de simulations (**Figure 7.2**).

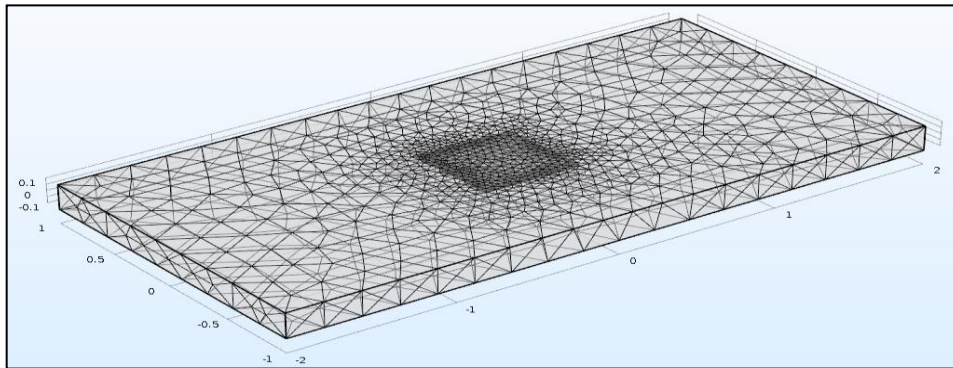


Figure 7.2 : Exemple de maillage – Modèle d'une dalle de béton avec défaut au centre.

Cette opération a pour rôle d'établir automatiquement, dans le respect de la géométrie de la structure étudiée, la forme des éléments, leur connectivité et les coordonnées des nœuds. La forme et la taille des éléments peuvent varier significativement. Il existe deux grands types de maillage à partir des bases quadrectangulaires (carrés, hexaèdree, etc.) ou triangulaires (triangle, tétraèdres, etc.) [43]. En modélisation 3D, les éléments finis utilisés pour le maillage sont des

éléments finis de volume (hexaèdres, prismes et tétraèdres) dont la géométrie tridimensionnelle est explicitement décrite. Les éléments tétraédriques basés sur une formulation triangulaire sont trop raides au premier degré donc à bords rectilignes et en plus la contrainte est uniforme dans l'élément. Il existe deux types de techniques de maillage, le maillage réglé et le maillage libre ou prédéfini.

Le maillage libre ou prédéfini en 3D génère des tétraèdres. Ce type de maillage (maillage allant de faible, normal, à plus élevé) est prédéfini par le logiciel d'éléments finis et permet de remplir n'importe quel volume sans aucune des contraintes imposées par la technique du maillage réglé. Dans ce cas, le temps de modélisation est avantageux, plus rapide. Cependant, une vigilance est de mise, car ce type maillage peut sous-estimer ou surestimer la qualité des résultats.

Le maillage réglé est souvent préféré au maillage libre. Il consiste à découper la structure en blocs de forme simple et d'imposer un nombre de nœuds adéquats sur chaque arête. Le nombre d'éléments générés (hexaèdres, prismes et voire tétraèdres) et leur qualité sont maîtrisés. Ainsi dans le cas de la simulation des vibrations mécaniques, il est recommandé d'utiliser un maillage dont la taille des éléments est au six (au moins 6 points par longueur d'onde) fois plus petite que la longueur d'onde la plus faible (longueur minimale se propageant dans la structure) recherchée pour avoir une meilleure précision et d'éviter toute dispersion du maillage, c'est-à-dire un maillage qui satisfait la condition de l'équation 7.1, telle que :

$$\text{Taille élément} \leq \frac{\lambda_{\min}}{6} \quad (7.1)$$

- **Définition des éléments structuraux**

L'interface du module physique « **Structural Mechanics Module** » définit les quantités et les fonctionnalités pour des analyses de contraintes. En général, l'interface définit les fonctionnalités de la mécanique de solide linéaire et non linéaire pour la résolution des déplacements. Les éléments structuraux (structures en plaques) sont définis par le modèle de matériau élastique linéaire « **Linear Elastic Material** ». Le matériau étudié obéit donc aux lois de l'élasticité linéaire. La description des matériaux élastiques dans le module inclut entre autres les matériaux isotropes. D'autres modèles de matériaux qui peuvent être utilisés sont l'hyper-élasticité générique ou encore les modèles de matériaux viscoélastiques linéaires

(matériaux qui présentent un comportement à la fois élastique et visqueux lorsqu'ils se déforment).

Le modèle de matériau élastique linéaire prend en compte les propriétés d'amortissement des structures à modéliser et les fonctionnalités initiales de contraintes et de déplacement, les fonctionnalités des conditions aux limites, mais aussi les fonctionnalités de la force ou de la source à appliquer. La force d'impact fréquentielle est obtenue à partir de l'équation 7.2 appliquée sur un point (source) défini.

$$F = F_p * e^{i\phi} \quad (7.2)$$

Avec :

- $F$  = Force fréquentielle ;
- $F_p$  = Amplitude de la force appliquée en Newton (N) suivant la direction z dans la structure ;
- $\phi = 2\pi f$  (fréquence de phase).

Les conditions aux limites peuvent varier selon les éléments structuraux. Pour les éléments structuraux tels que les plaques, ce sont les conditions aux limites libres qui sont les plus utilisées. D'autres conditions aux limites telles que les conditions d'appuis fixes, en utilisant par exemple l'option « **fixed constraint** » de COMSOL peuvent être utilisées pour annuler les déplacements ou encore des conditions d'appuis simples, libres ou encastres.

#### • **Résolution et simulation**

La résolution des problèmes dans le cas des structures mécaniques peut se faire dans plusieurs domaines d'études (fréquences propres, domaine de fréquence, domaine temporel, domaine stationnaire, analyses précontraintes, etc.). La modélisation dans le domaine temporel requiert une grande capacité mémoire de calcul et un temps de calcul assez long surtout pour la simulation en 3D. Pour les raisons évoquées en termes de mémoire et de temps, il est préférable de travailler dans le domaine fréquentiel. Ainsi pour la résolution des problèmes, on définit une gamme de fréquences et un pas d'échantillonnage. Par conséquent, pour l'analyse modale, nous avons utilisé le domaine des fréquences propres (Eigenfrequency) et pour l'étude de la réponse

forcée ou de la réponse impulsionnelle nous avons utilisé le domaine des fréquences (Frequency Domain).

- **Résultats et visualisation**

Après la résolution (analyse modale et analyse de la RI) les résultats sont représentés en 2D (surfaces) ou en 3D (volumes, cas des cartographies des modes propres issues de l'étude modale, **Figure 7.3**) ou en 1D (courbes de mobilité spectrales, **Figure 7.4**). Les résultats ou données peuvent être exportés pour être traités dans d'autres types de formats (Word, Excel, Matlab).

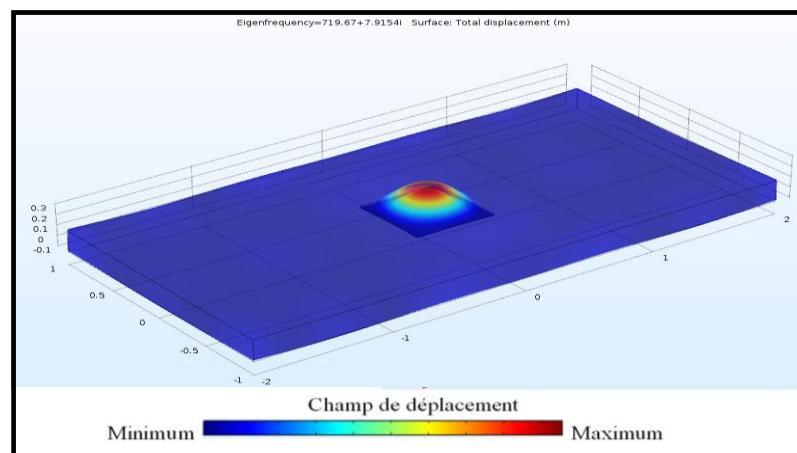


Figure 7.3 : Résultat de l'analyse modale d'une dalle avec un défaut au centre.

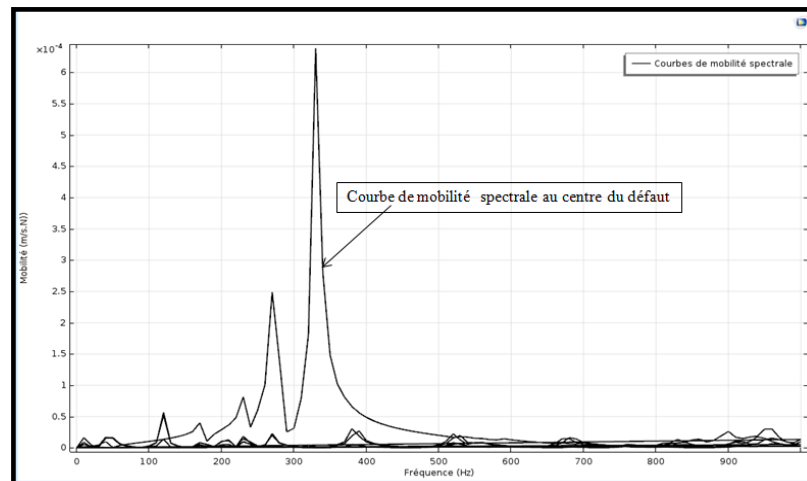


Figure 7.4 : Résultat de l'analyse forcée (Courbes de mobilité spectrale).

### 7.1.2 Conclusion

Ce paragraphe était consacré à la description de la mise en œuvre du programme de validation numérique. Nous avons fait un bref rappel sur la méthode d'éléments finis et sur les différentes étapes de modélisation par éléments finis à partir du logiciel **COMSOL Multiphysics**. Ce logiciel permet non seulement d'effectuer l'analyse modale, mais aussi l'analyse de la réponse impulsionnelle. Grâce à ce logiciel, nous allons pouvoir valider la nouvelle approche en basant l'étude sur l'exploitation de quelques modèles numériques.

## 7.2 Exploitation du modèle numérique pour la validation de l'approche développée

La validation de l'approche développée est donc basée sur l'analyse de la réponse modale et de la réponse forcée. Pour illustrer cela, considérons trois simulations numériques :

- **Simulation 1** : Soit une dalle de béton de dimensions  $4\text{ m} \times 2\text{ m} \times 0,2\text{ m}$ , de module d'élasticité égal à 30 GPa, de coefficient de Poisson égal à 0,2 et de densité égale à  $2500\text{ kg/m}^3$  affectée par un défaut (vide) de dimensions  $80\text{ cm} \times 80\text{ cm} \times 0,2\text{ mm}$  situé à 5 cm de profondeur.
- **Simulation 2** : Soit une dalle de béton de dimensions  $4\text{ m} \times 2\text{ m} \times 0,2\text{ m}$ , de module d'élasticité égal à 30 GPa, de coefficient de Poisson égal à 0,2 et de densité égale à  $2500\text{ kg/m}^3$  affectée par un défaut (vide) de dimensions  $100\text{ cm} \times 100\text{ cm} \times 0,2\text{ mm}$  situé à 5 cm de profondeur
- **Simulation 3** : Soit une dalle de béton de dimensions  $4\text{ m} \times 2\text{ m} \times 0,2\text{ m}$ , de module d'élasticité égal à 30 GPa, de coefficient de Poisson égal à 0,2 et de densité égale à  $2500\text{ kg/m}^3$  affectée par un défaut (vide) de dimensions  $150\text{ cm} \times 150\text{ cm} \times 0,2\text{ mm}$  situé à 5 cm de profondeur.

### 7.2.1 Analyse modale

L'analyse modale a pour but pour une structure donnée, d'étudier les différents modes propres de vibrations (les modes propres locaux associés aux défauts, les modes globaux) ainsi que leurs fréquences propres. L'étude permet de montrer qu'une dalle saine ou affectée par des défauts

vibre selon plusieurs modes de déformation. Après l'analyse modale par le logiciel d'éléments finis **COMSOL Multiphysics**, nous présentons ici quelques modes propres des trois simulations numériques étudiées respectivement la **Figure 7.5** pour la simulation 1, la **Figure 7.6** pour la simulation 2 et la **Figure 7.7** pour la simulation 3. Sur les différentes simulations, on peut distinguer deux types de modes de vibrations, les modes globaux et les modes locaux.

- **Simulation 1** : les modes de vibration globaux (**Figures 7.5 A, B, C, E, F, I, J**) et les modes de vibration locaux (**Figures 7.5, D, G, H**) ;
- **Simulation 2** : les modes de vibration globaux (**Figures 7.6 A, B, E, F, G, I**) et les modes de vibration locaux (**Figures 7.6, C, D, H, J**) ;
- **Simulation 3** : Les modes de vibration globaux (**Figures 7.7 A, B, J**) et les modes de vibration locaux (**Figures 7.7, C, D, E, F, G, H, I**).

Dans le cas des modes globaux, c'est toute la dalle qui vibre y compris le défaut. Par contre dans le cas des modes locaux, seul le défaut rentre en vibration. Le champ de déplacement dans ce dernier cas est maximal uniquement dans la zone de défaut. L'étude montre également que plusieurs modes locaux peuvent être excités en fonction de la gamme de fréquences choisie et notamment le premier mode vibration, le mode  $m(1,1)$ . Ce mode est excité pour la simulation 1 à 428 Hz (**Figure 7.5 D**), pour la simulation 2 à 263 Hz (**Figure 7.6 C**) et pour la simulation 3 à 126 Hz (**Figure 7.7 C**).

L'étude modale nous aide à mieux détecter et à situer la position du défaut dans la dalle. On possède également des informations sur les modes propres et les fréquences propres de vibration des défauts.



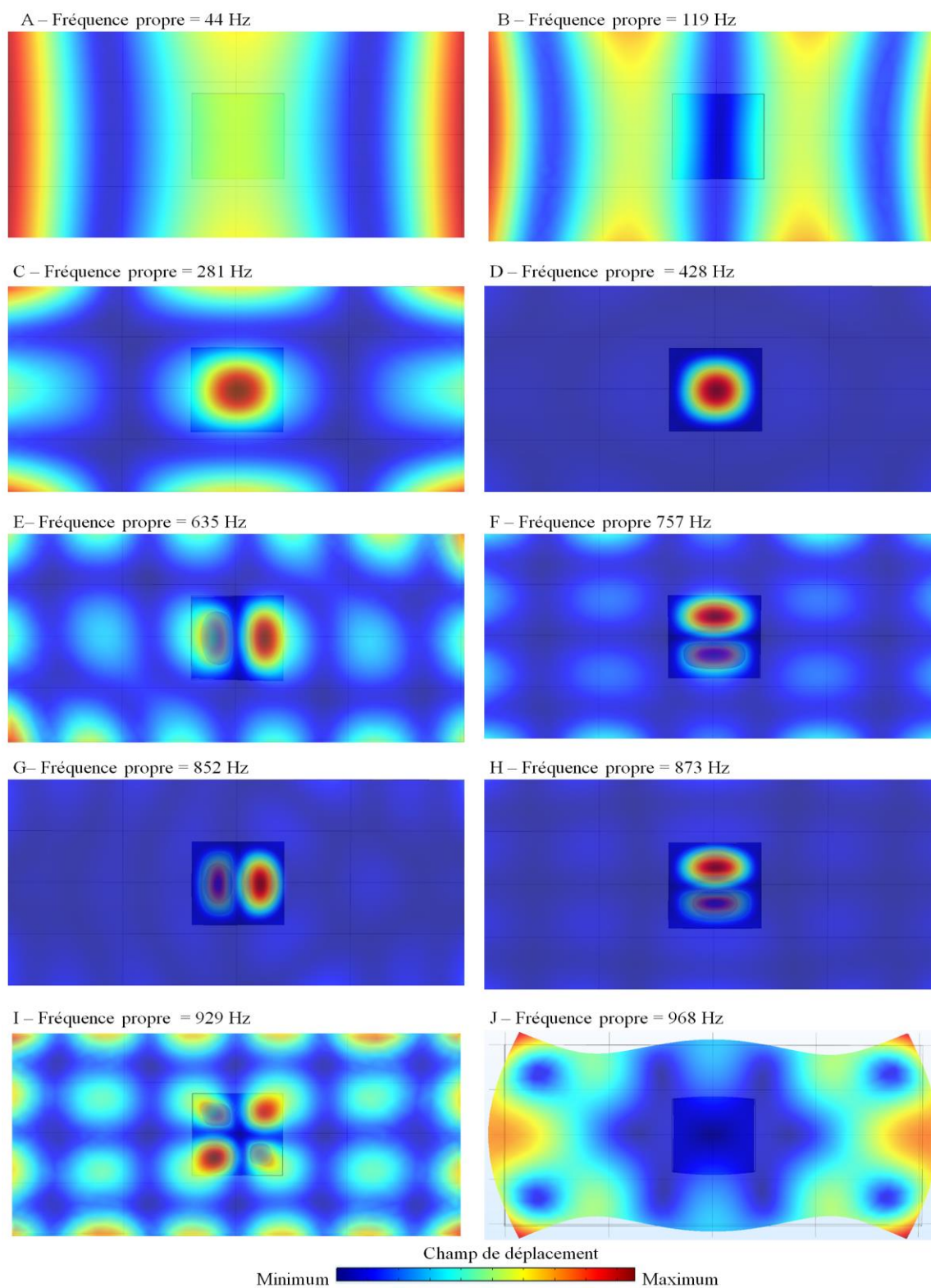


Figure 7.5 : Quelques modes de vibration (Analyse modale) – Simulation 1.

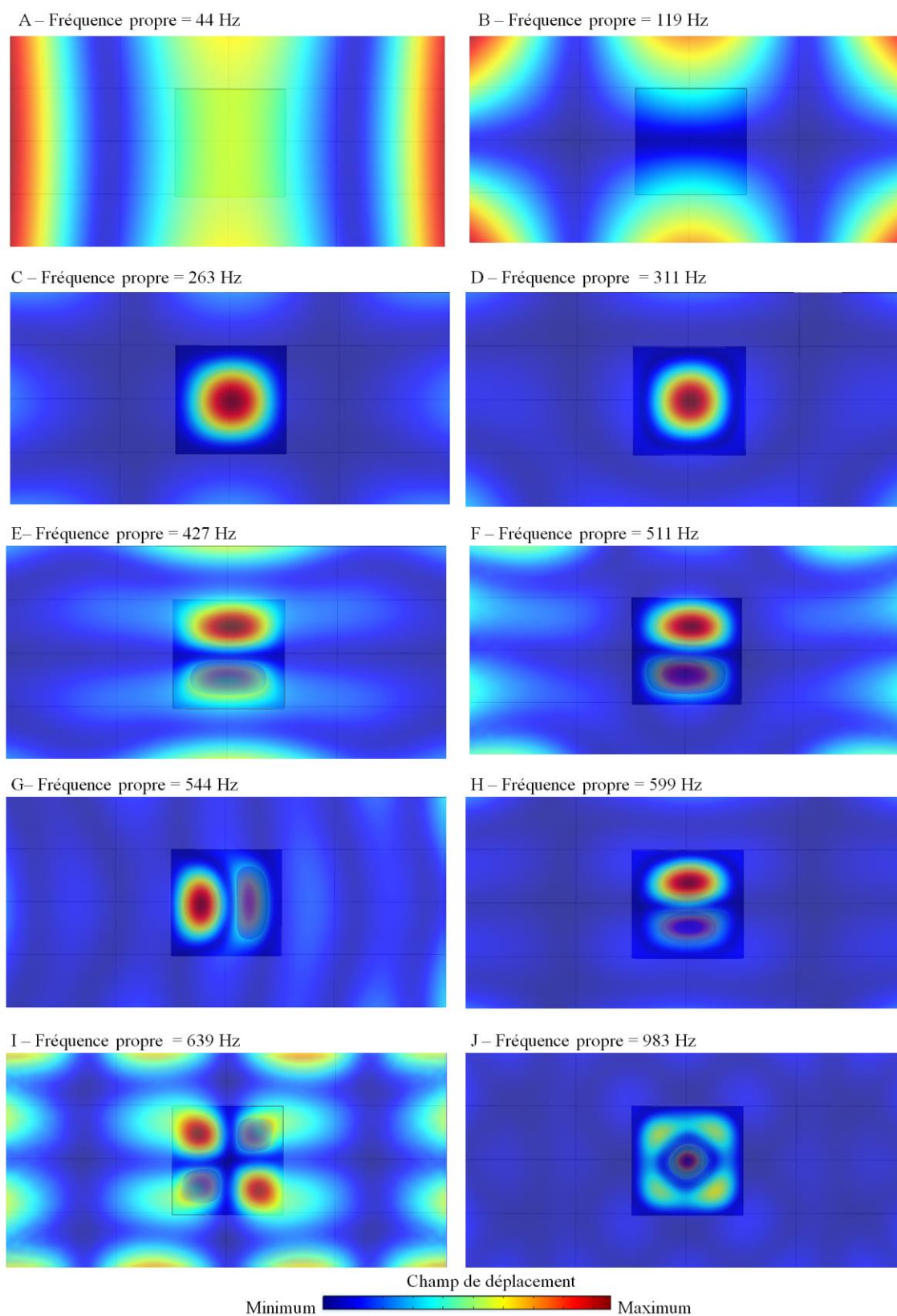


Figure 7.6 : Quelques modes de vibration (Analyse modale) – Simulation 2.

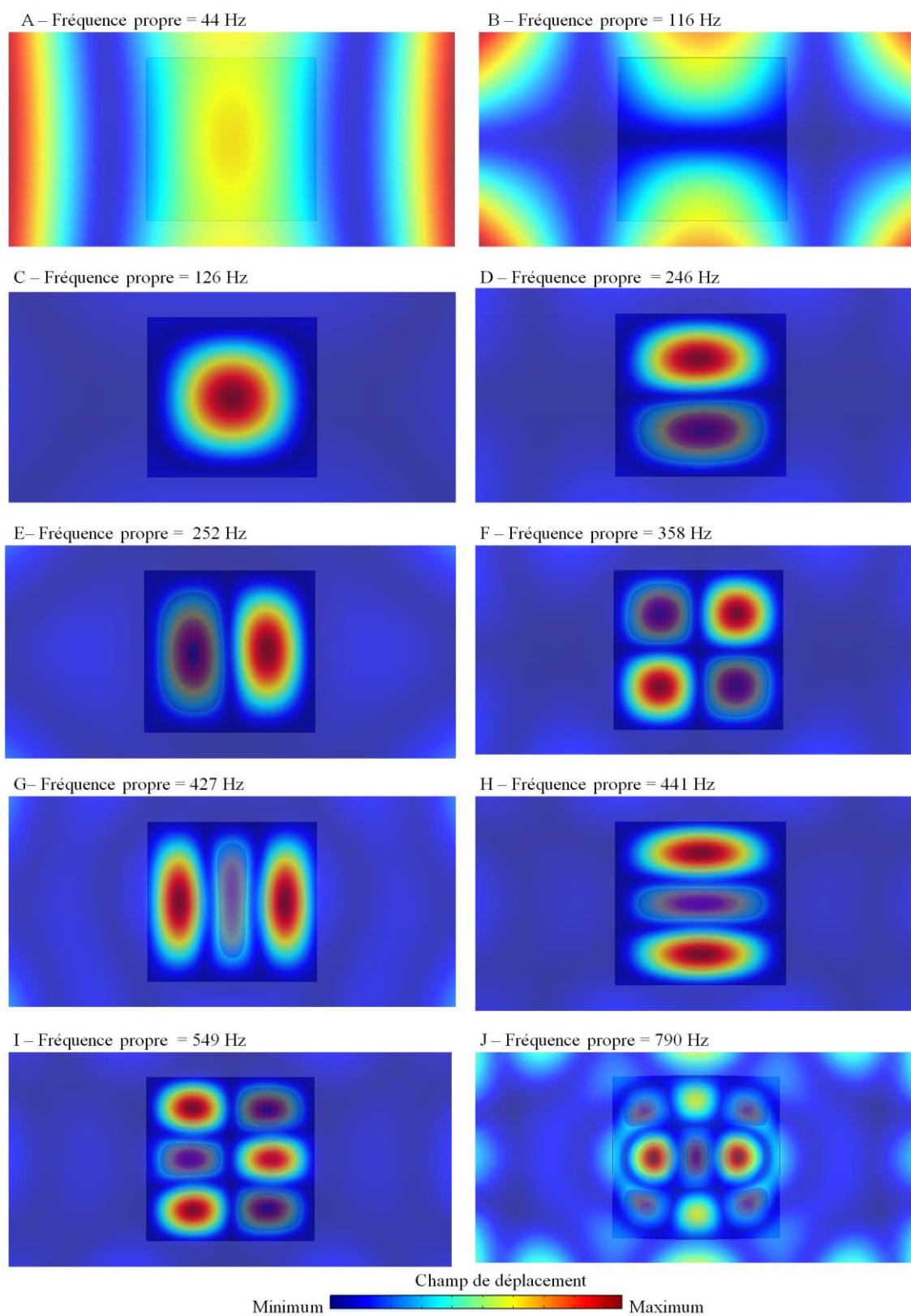


Figure 7.7 : Quelques modes de vibration (Analyse modale) – Simulation 3.

### 7.2.2 Analyse de la réponse forcée

L'analyse de la réponse forcée des dalles a pour but de déterminer la courbe de la mobilité spectrale au point d'impact. Les résultats de la réponse forcée (courbes de mobilité spectrale) obtenus par éléments finis sur les modèles étudiés sont représentés respectivement sur la **Figure 7.8** pour la simulation 1, la **Figure 7.9** pour la simulation 2 et la **Figure 7.10** pour la simulation 3. L'analyse de ces courbes montre qu'il existe une corrélation entre les modes propres, les fréquences propres associées aux défauts obtenues par l'analyse modale et les différentes fréquences de résonance sur les courbes de mobilité spectrale. En combinant donc l'analyse modale et l'analyse de la réponse forcée de chaque modèle, on voit qu'il existe bien une corrélation entre la fréquence propre associée au premier mode de vibration du défaut obtenue par l'analyse modale et la fréquence de résonance correspondant au pic de mobilité sur la courbe de mobilité spectrale obtenue par l'analyse de la réponse forcée. Cette fréquence de résonance sur la courbe de mobilité correspond donc à la fréquence de résonance du défaut et donc à sa fréquence propre de premier mode de vibration.

### 7.2.3 Étude comparative entre l'analyse modale et l'analyse de la RI

Les **Figures 7.8, 7.9, 7.10** présentent les résultats combinés des courbes de mobilité spectrale et les cartographies des analyses modales des différentes simulations numériques décrites ci-dessus. Ces résultats ont été obtenus en réalisant l'impact au centre du défaut, c'est-à-dire dans la position de la plus forte amplitude de la mobilité maximale du défaut :

- **Pour la simulation 1**, la fréquence de résonance du pic correspondant à la vibration du défaut sur la courbe de mobilité spectrale est de **430 Hz**. La fréquence propre associée au défaut correspondant au premier mode de vibration obtenue par l'analyse modale est de **428 Hz (Figure 7.8)** ;
- **Pour la simulation 2**, la fréquence de résonance du pic correspondant à la vibration du défaut sur la courbe de mobilité spectrale est de **265 Hz**. La fréquence propre associée au défaut correspondant au premier mode de vibration obtenue par l'analyse modale est de **263 Hz (Figure 7.9)** ;
- **Pour la simulation 3**, la fréquence de résonance du pic correspondant à la vibration du défaut sur la courbe de mobilité spectrale est de **126 Hz**. La fréquence propre associée



au défaut correspondant au premier mode de vibration obtenue par l'analyse modale est de 130 Hz (Figure 7.10).

- **Résultat - Simulation 1**

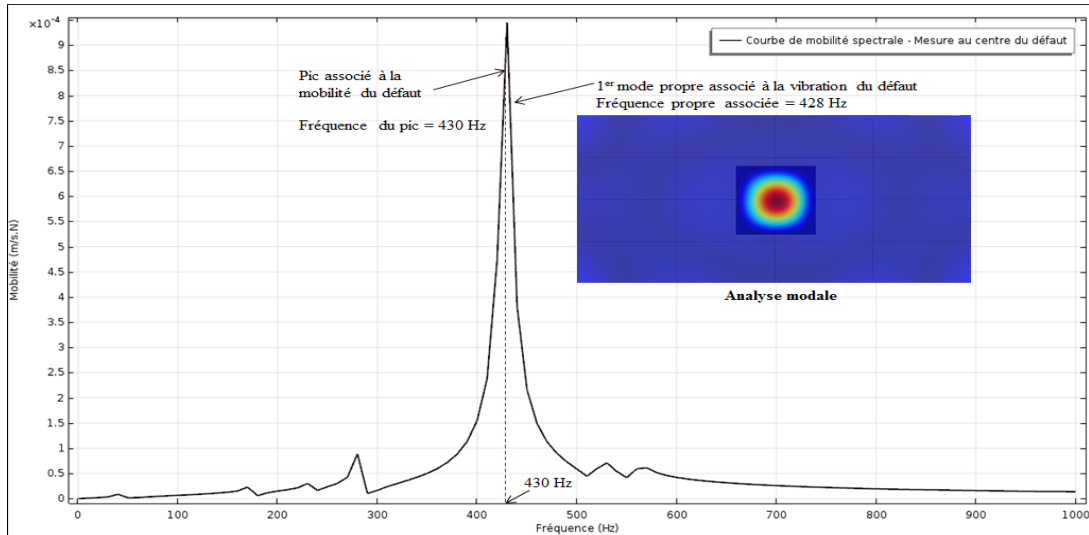


Figure 7.8 : Comparaison - Analyses modale et Réponse impulsionnelle – Dalle avec un défaut de 80 cm \* 80 cm \* 0,2 cm.

- **Résultat - Simulation 2**

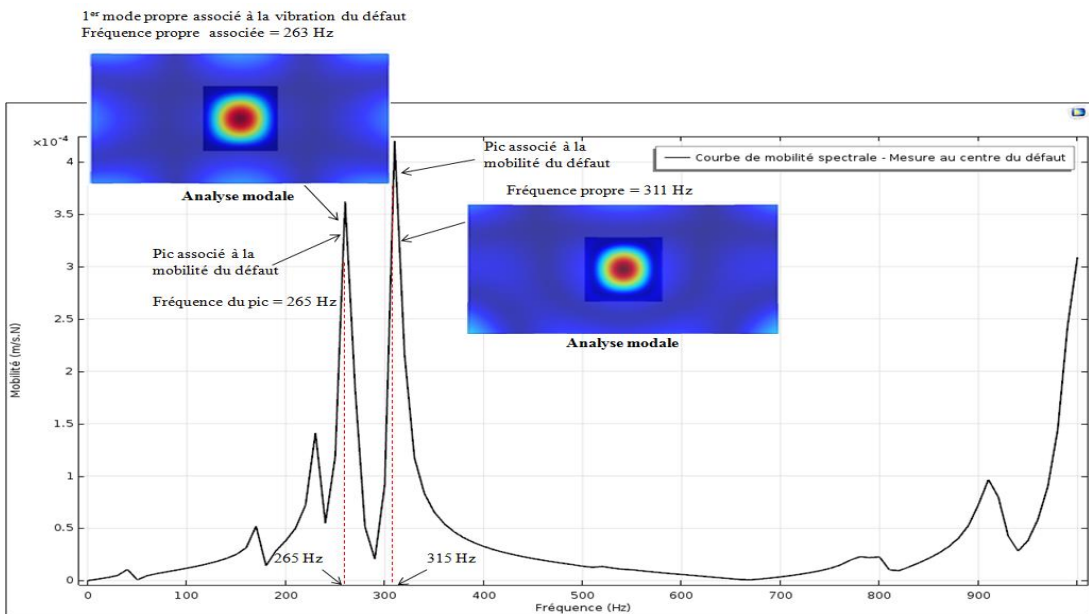


Figure 7.9 : Comparaison - Analyses modale et Réponse impulsionnelle – Dalle avec un défaut de 100 cm \* 100 cm \* 0,2 cm.

- **Résultat - Simulation 3**

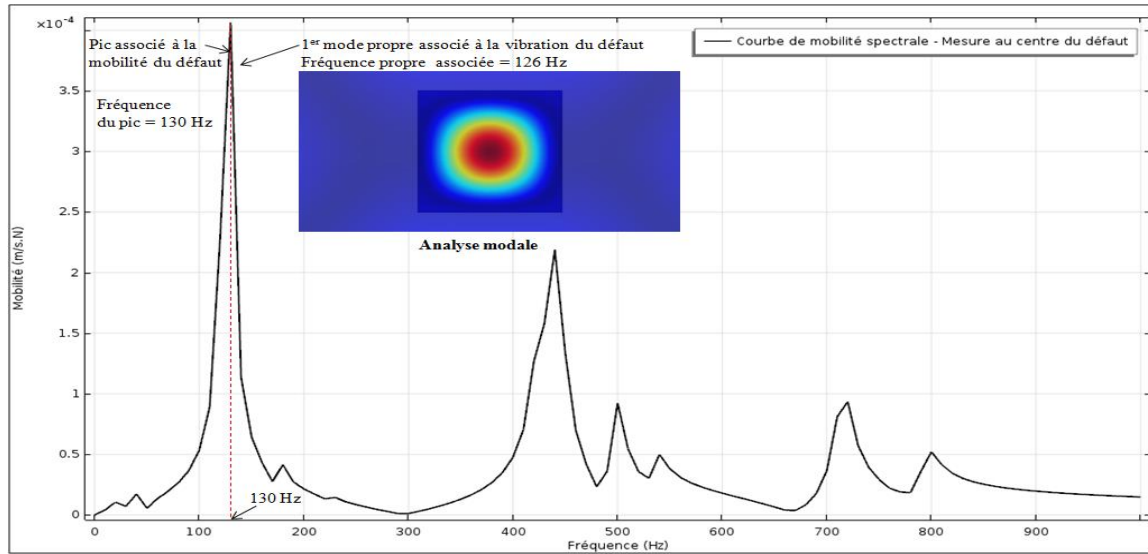


Figure 7.10 : Comparaison - Analyses modale et Réponse impulsionnelle – Dalle avec un défaut de 150 cm \* 150 cm \* 0,2 cm.

## 7.2.4 Conclusion

Après l'analyse des résultats, on peut tirer les conclusions suivantes : une courbe de mobilité spectrale peut être caractérisée d'une part par les fréquences de résonance associées à la vibration locale du défaut et d'autre part, par les fréquences de résonance associées à la vibration globale de la dalle. Ainsi, la connaissance des fréquences propres associées à la vibration des défauts dans une dalle de béton peut fournir des informations, du point de vue de la détection et de la caractérisation des paramètres du défaut c'est-à-dire l'évaluation de son diamètre et sa profondeur.

## 7.3 Détection et caractérisation des paramètres du défaut :

### Diamètre, profondeur

L'analyse modale a montré qu'un défaut dans une dalle se comporte comme une plaque entière qui vibre différemment de l'ensemble de la dalle selon ses modes et ses fréquences propres distincts de ceux de la dalle entière. Les modes de vibrations varient en fonction des paramètres tels que l'état du support de la dalle, le module d'élasticité de la dalle, la densité de la dalle, les

dimensions de la dalle, l'épaisseur du défaut, etc., et surtout en fonction des caractéristiques des défauts principalement la taille et la profondeur du défaut.

### ➤ Étude modale en fonction de la taille du défaut

Plus la taille des défauts est importante, plus les fréquences propres (notamment la première fréquence propre) associées à la vibration de ces défauts tendent vers les basses fréquences (**Figure 7.11**).

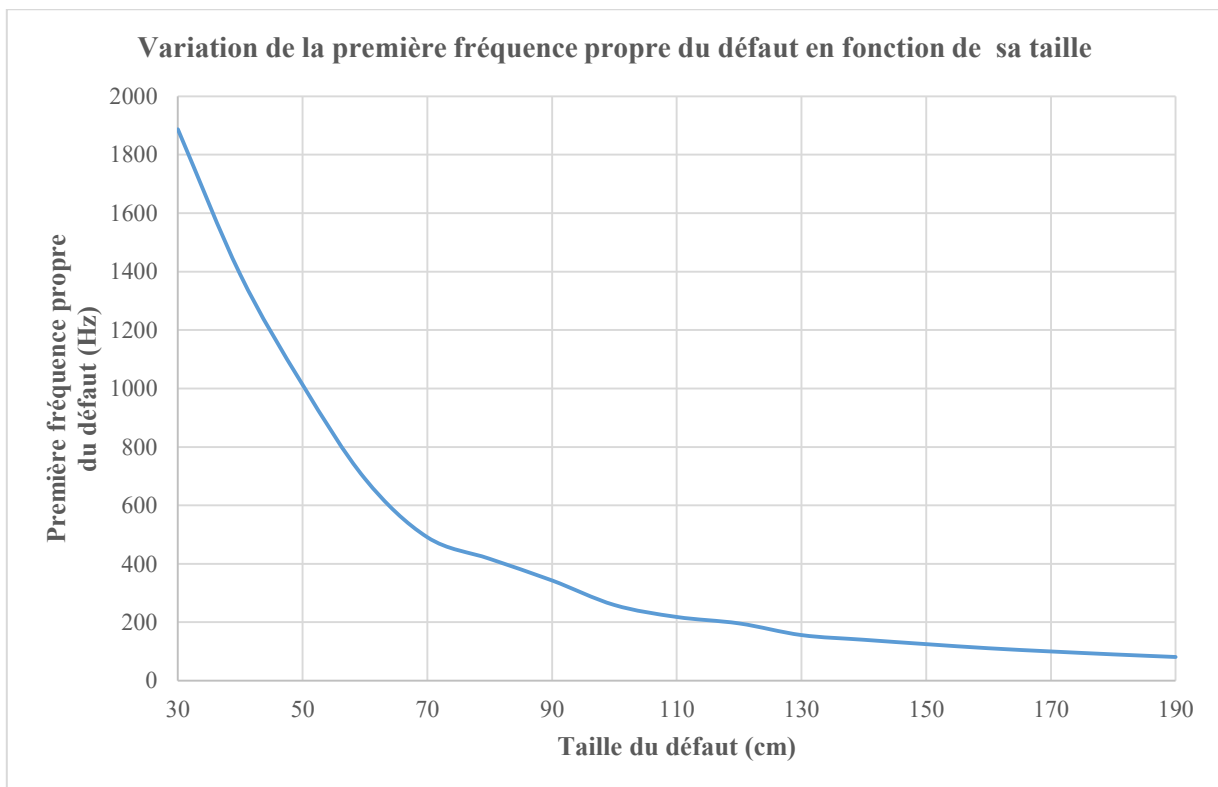


Figure 7.11 : Variation de la première fréquence propre du défaut en fonction de la taille du défaut.

La taille du défaut est donc un paramètre très sensible à l'évaluation de la perte de l'adhérence. Les résultats de l'étude modale montrent que défauts de taille inférieure à 50 cm ont des fréquences propres situées au-dessus de 1000 Hz tandis que pour les défauts de taille supérieure à 50 cm, leurs fréquences propres sont situées en dessous de 1000 Hz.

➤ **Analyse modale et analyse de la réponse forcée par rapport à la profondeur du défaut**

Considérons le cas d'une dalle de béton caractérisée par un défaut de forme carrée de dimensions de 180 cm \* 180 cm \* 0,2 mm. En faisant varier la profondeur du défaut, on constate après l'analyse modale que les premiers modes de vibrations ainsi que les fréquences propres associées au défaut varient considérablement (**Figure 7.12**). Le défaut placé à une profondeur de 3 cm sous la dalle, sa fréquence propre est égale à 56 Hz (**Figure 7.12, A**) par contre ce même défaut placé à 10 cm de profondeur, sa fréquence propre est égale à 160 Hz (**Figure 7.12, D**). La variation de la fréquence propre du défaut entre les deux profondeurs est importante.

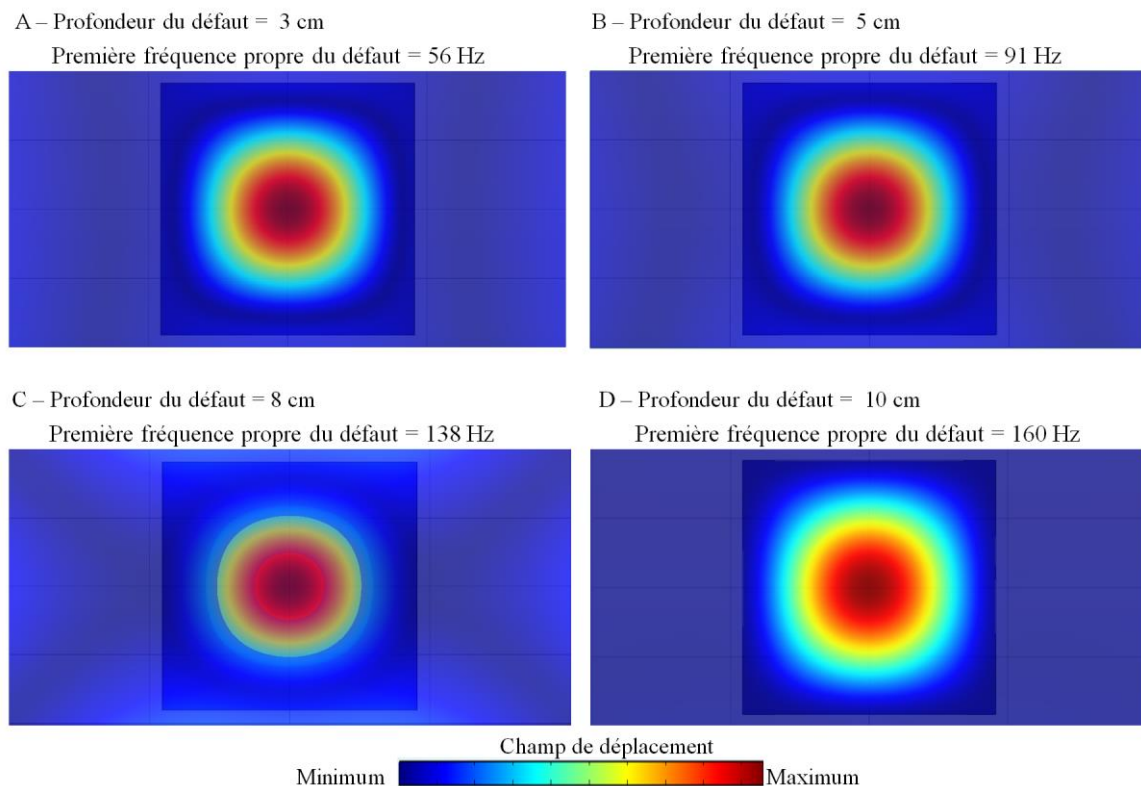


Figure 7.12 : Analyse modale en fonction de la profondeur du défaut.

La fréquence propre augmente avec la profondeur. La profondeur du défaut affecte donc l'évaluation de la perte de l'adhérence. L'analyse modale montre que pour les défauts de surface, leurs fréquences propres tendent vers les basses fréquences (**Figure 7.13**).



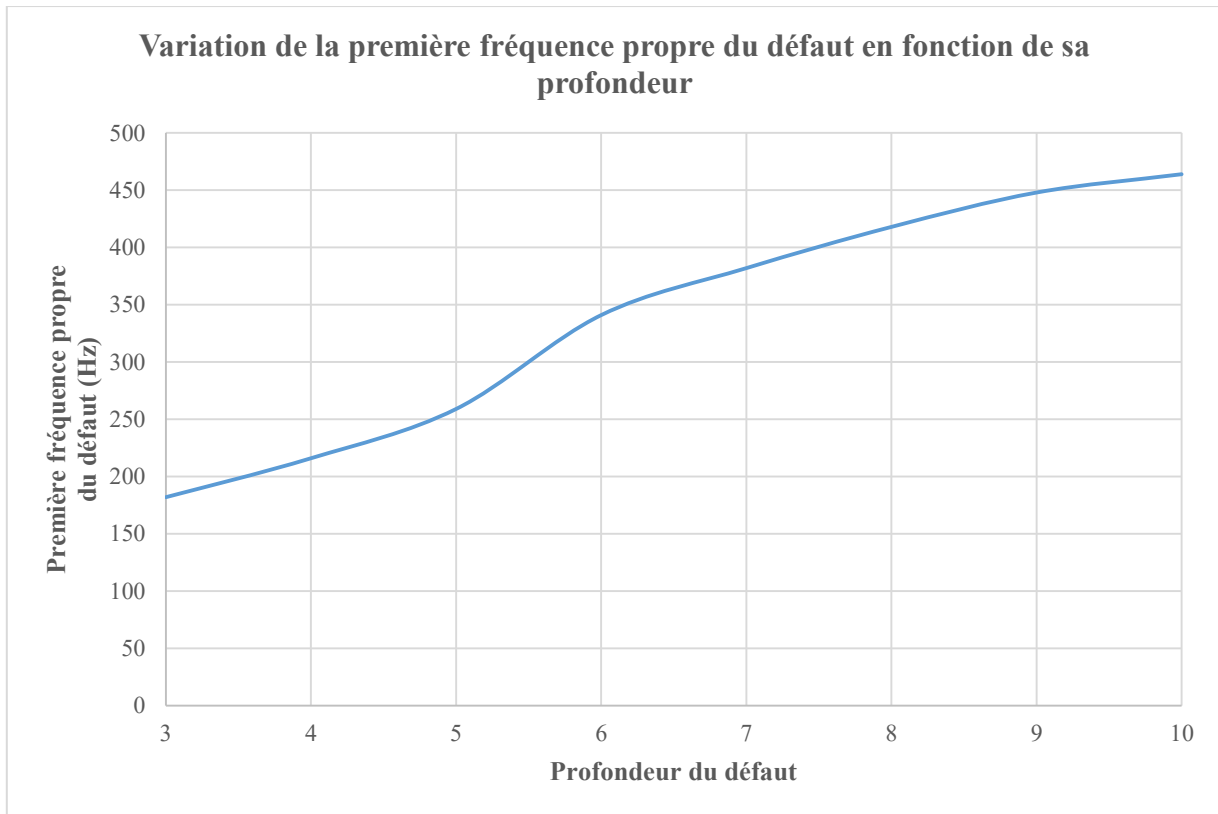


Figure 7.13 : Variation de la première fréquence propre du défaut en fonction de la profondeur (défaut de dimensions de 100 cm \* 100 cm \* 0,2 mm).

Parmi les caractéristiques d'un défaut, la profondeur et la taille ont un impact considérable sur la variation de la fréquence propre et sur la variation de la mobilité dynamique.

- **Caractérisation des paramètres du défaut : Diamètre et profondeur**

Nous avons montré dans l'étude précédente que les paramètres tels que la taille et la profondeur du défaut influent sur la réponse dynamique. La connaissance de ces deux paramètres est cruciale notamment pour les ingénieurs de réparation des structures qui souhaitent au préalable avoir des informations sur l'étendue et la position des dégradations dans les dalles.

Nous avons donc voulu nous intéresser à une possibilité de caractériser ces paramètres en partant de l'analyse modale et de l'analyse de réponse forcée. En effet, l'analyse modale a montré dans une dalle avec un défaut que non seulement la dalle vibre (vibration globale), mais aussi toute la partie située au-dessus du défaut est en vibration (**Figure 7.14**). De plus, cette partie peut vibrer indépendamment de la vibration globale selon ses modes propres et ses fréquences

associées (**Figures 7.5, 6, 7**). Cette partie en elle seule constituerait donc une plaque mince dont la base correspondrait à la position du défaut dans une dalle.

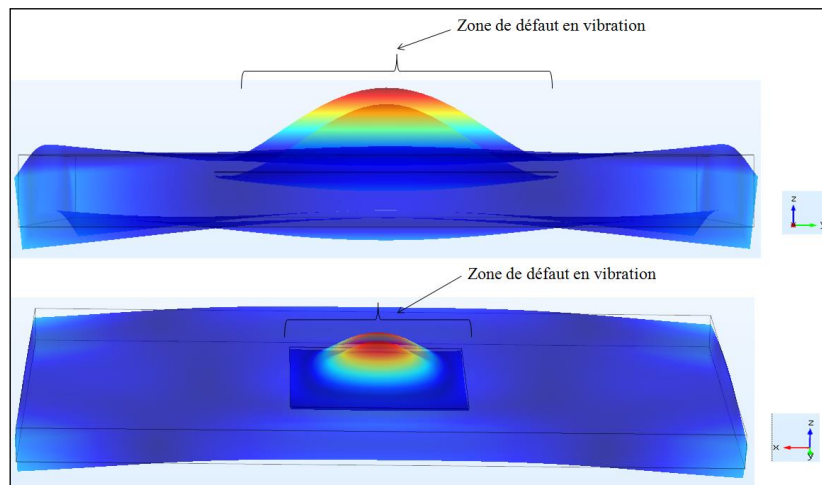


Figure 7.14 : Vibration de la partie située au-dessus du défaut – Analyse modale 3D.

En admettant ainsi cette partie comme une plaque à part entière, l’hypothèse que nous avons formulée était de se dire que sa fréquence propre de vibration correspondrait à la fréquence de vibration du défaut. Ainsi, connaissant cette fréquence vibratoire, l’objectif était de savoir s’il était possible d’estimer les caractéristiques du défaut à savoir la taille et la profondeur en utilisant l’équation de comportement mécanique appliquée à la vibration des plaques minces en flexion. La profondeur du défaut recherchée dans cette équation serait considérée comme étant l’épaisseur de la plaque.

## 7.4 Validation de l’approche et caractérisation des paramètres du défaut

Considérons ainsi la simulation numérique 2 définie plus haut, qui décrit une dalle de béton affectée en son centre par un défaut de dimensions : 100 cm \* 100 cm \* 0,2 mm, situé à une profondeur de 5 cm sous la dalle. Pour avoir une meilleure compréhension du fonctionnement de l’approche développée, les quatre paramètres d’analyse (**Tableau 7.2**) ont été définis et ajustés en fonction des informations issues de l’analyse modale et de la courbe de mobilité spectrale (**Figure 7.15**).

Tableau 7.2 : Paramètres d'analyse de l'approche développée.

Analyse	Paramètre ou seuil de détection des pics relatif (%)	Paramètre de résolution absolu (Hz)	Paramètre d'émergence d'image (réel absolu)	Seuil de mobilité d'affichage d'image Relatif (%)
Analyse	Epsilon	70	5	0.00

Une fois les paramètres d'analyses fixés, l'exécution du programme d'analyse permet d'établir les cartographies d'évaluation de la taille du défaut (**Figure 7.15**) ainsi que les cartographies d'évaluation de la profondeur du défaut (**Figures 7.16, 17, 18**).

### ➤ Résultats d'analyse : Détection du défaut

La cartographie de la vibration globale (**Figure 7.15**) permet uniquement l'évaluation de la taille du défaut. Cette cartographie augmente la résolution de détection des défauts puis qu'elle résulte de la sommation de toutes les fréquences propres de vibration de la structure auscultée.

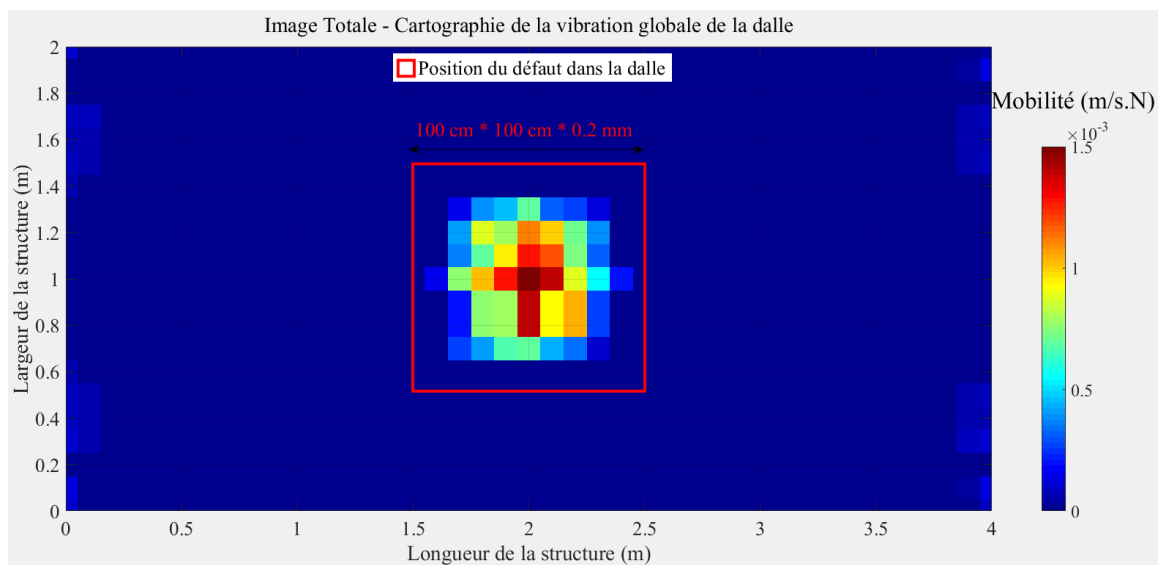


Figure 7.15 : Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection – Cartographie de la vibration globale de la dalle.

### ➤ Résultats d'analyse : Évaluation de la taille et de la profondeur du défaut

Le programme évalue la taille du défaut en comptant le nombre de pixels correspondant. La taille fournie par le programme est de 70 cm \* 70 cm, ce qui correspond à 70 % de représentation spatiale par rapport à la taille réelle du défaut simulé de 100 cm \* 100 cm.

D'après l'analyse modale, le défaut vibre à une première fréquence propre égale à 263 Hz (**Figure 7.5**). Cette fréquence est sensiblement égale à celle obtenue par l'analyse de l'approche proposée et est égale à 280 Hz. Cette fréquence correspond à la fréquence vibratoire de premier mode (1,1) du défaut. Les déplacements selon les différents axes d'orientation du défaut sont maximums au centre (ventre du défaut) et nuls aux extrémités (nœuds du défaut).

L'évaluation de la profondeur se fait soit à partir de :

- **La méthode 1.** Elle détermine la profondeur du défaut en se basant sur la cartographie de mode propre correspondant à sa première fréquence propre de vibration. Pour une première fréquence propre du défaut égale à 280 Hz, sa profondeur est estimée entre 53 mm et 93 mm (**Figure 7.17**).
- **La méthode 2.** Elle détermine la profondeur du défaut en utilisant la fréquence propre moyenne issue des cartographies des modes propres, se situant autour de la première fréquence propre vibratoire du défaut et dont les coefficients de corrélation par rapport à la cartographie de vibration globale (**Figure 7.15**) sont élevés.

Dans l'exemple de simulation présentée dans ce paragraphe, deux cartographies aux coefficients de corrélation élevés ont été établies. La **Figure 7.16** dont correspondant à une fréquence propre de 210 Hz, donne une profondeur du défaut comprise entre 42 mm et 79 mm. La **Figure 7.17** correspondant à la première fréquence propre du défaut de 280 Hz, donne une profondeur du défaut comprise entre 53 mm et 93 mm. La cartographie moyenne de ces deux cartographies correspondant à une fréquence propre moyenne de 245 Hz, donne une profondeur du défaut estimée entre 47 mm et 86 mm (**Figure 7.18**).

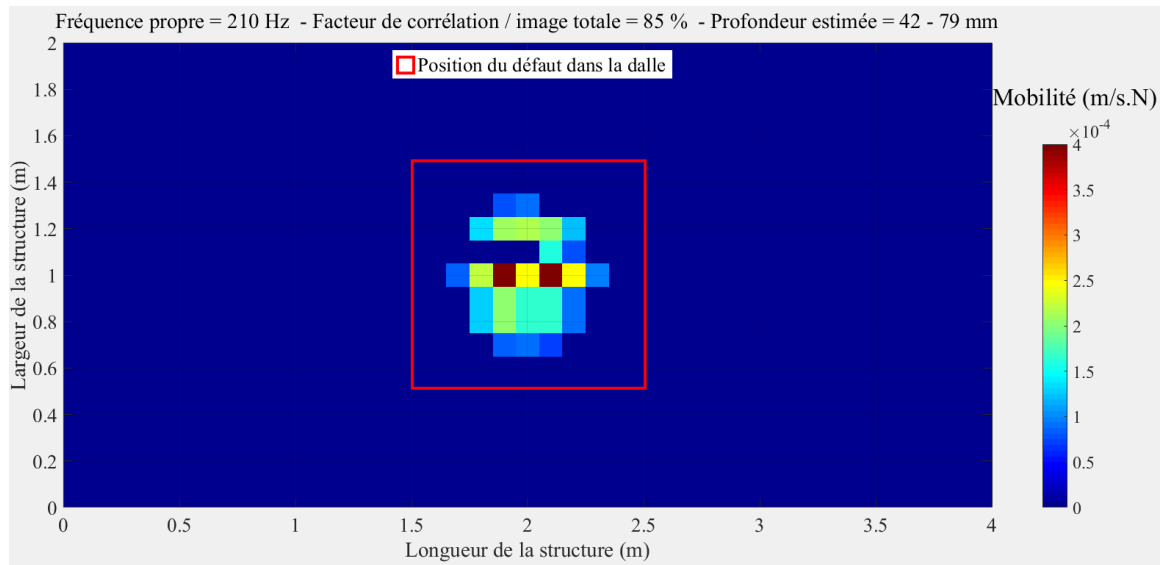


Figure 7.16 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour l’estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 210 Hz.

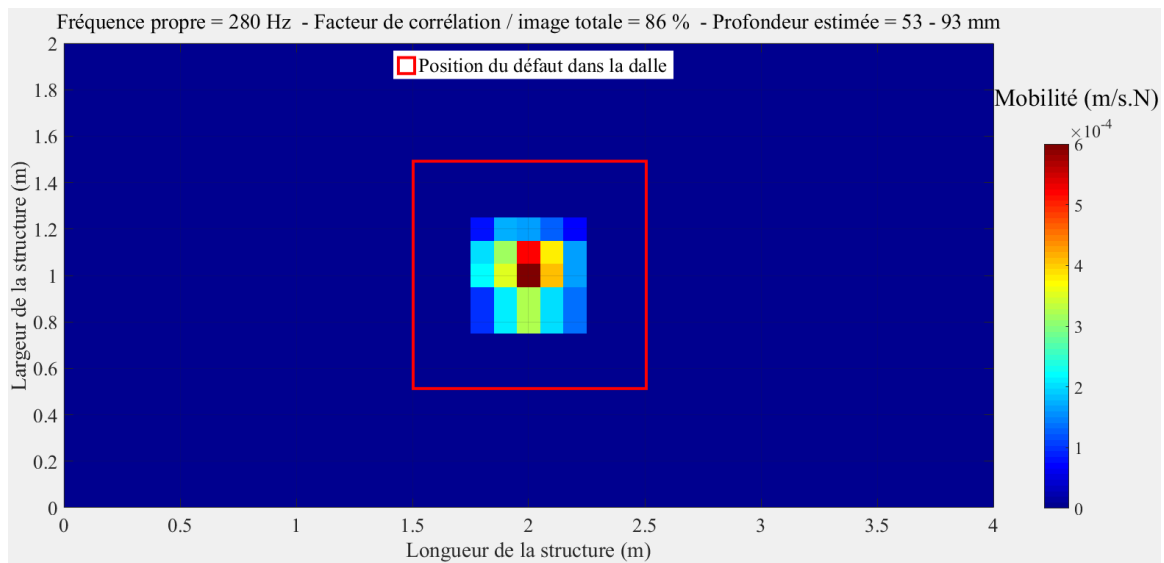


Figure 7.17 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour l’estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 280 Hz (mode 1).

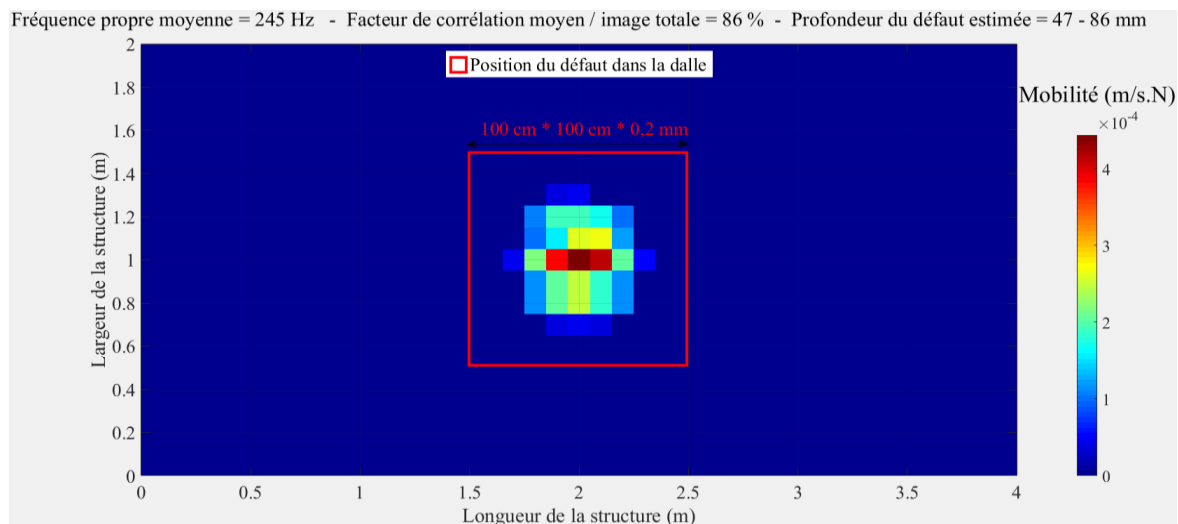


Figure 7.18 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour l’estimation moyenne du diamètre et la profondeur du défaut à partir des cartographies des Figures 7.16, 17.

## 7.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la mise œuvre et l’exploitation du modèle numérique pour la validation de l’approche développée. Nous avons montré la pertinence et sa capacité de cette approche à détecter et à caractériser la qualité de l’adhérence.

Dans le chapitre suivant, nous procéderons à l’étude paramétrique afin de mieux comprendre les possibilités ainsi que les limites d’utilisation de ce nouvel outil d’analyse.

## CHAPITRE 8

# ÉTUDE PARAMÉTRIQUE NUMÉRIQUE DE LA PERTE DE L'ADHÉRENCE PAR L'APPROCHE DÉVELOPPÉE

L'étude paramétrique va permettre de valider l'approche développée. En effet, pour mieux comprendre le phénomène de la perte d'adhérence dans les structures en réparation ou dans des structures anciennes, nous analyserons l'impact des paramètres d'analyse sur l'identification de métriques du défaut parmi lesquels la largeur ou le diamètre, la profondeur et l'épaisseur du défaut. La réponse dynamique peut être complexe et avoir un impact sur la capacité de la méthode de la RI à détecter et à caractériser la décohésion.

Ce chapitre sera constitué de quatre principales parties résumées dans la **Figure 8.1**, à savoir la présentation de l'étude paramétrique, les résultats de l'étude paramétrique, l'analyse des résultats de l'étude paramétrique et la conclusion. L'objectif de l'étude est de montrer la pertinence de l'approche en termes de détection et de caractérisation de la qualité d'adhérence (taille et profondeur du défaut) en faisant varier les différents paramètres d'analyse définis dans le programme c'est-à-dire le seuil de détection des pics, le paramètre de résolution ou de précision pour l'assemblage des fréquences propres proches, le paramètre d'émergence ou multiplicateur d'image et le paramètre de seuil image ou d'affichage d'image. L'étude permettra de fixer et de montrer les limites de chacun des paramètres pour l'estimation de la profondeur et l'élaboration de la cartographie de la vibration globale d'une dalle de béton.

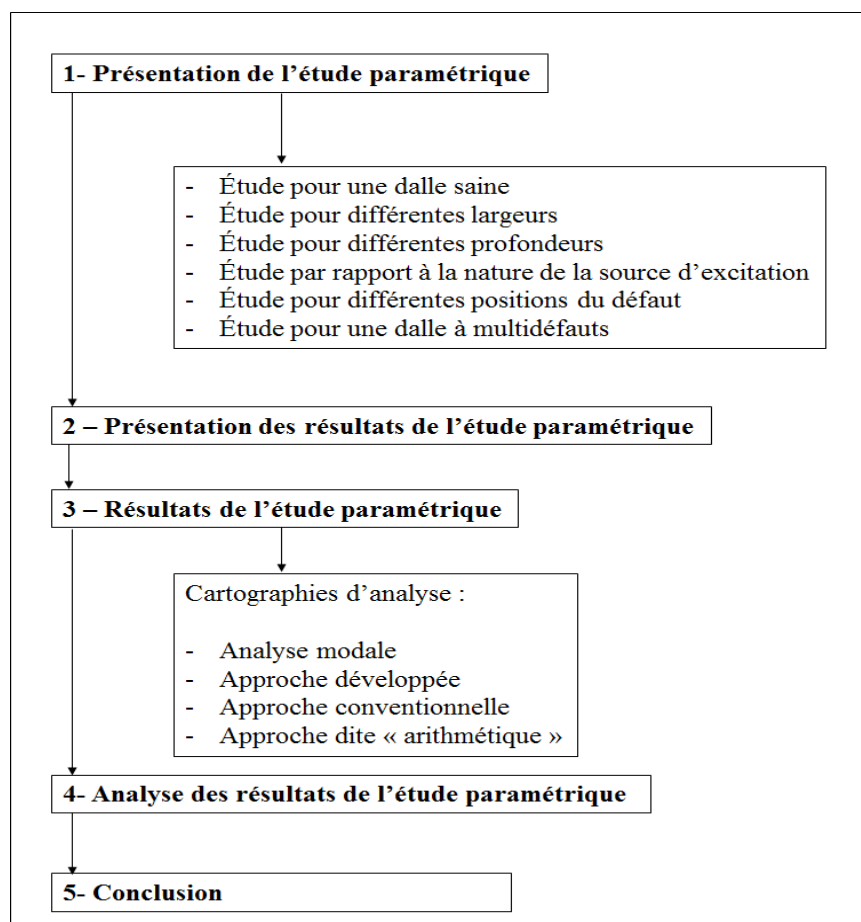


Figure 8.1 : Résumé de la structure du chapitre 8.

## 8.1 Présentation de l'étude paramétrique

Pour valider l'approche proposée, nous allons considérer des cas simples de modèles numériques. Les conditions aux limites imposées sont des conditions libres sur toutes les frontières. L'analyse paramétrique est basée sur l'étude de quelques paramètres dont ceux qui ont le plus d'impact sur la réponse vibratoire.

### 8.1.1 Étude pour une dalle saine sans défaut, dalle de référence

Le but de l'étude est de montrer la différence entre une dalle saine et une dalle avec défaut afin de montrer l'efficacité de l'approche développée en termes de détection et de localisation. Pour cette étude, considérons une dalle saine de dimensions 4000 mm \* 2000 mm \* 200 mm. C'est une dalle de béton ordinaire non armée dont les caractéristiques sont consignées dans le **Tableau 8.1**.



Tableau 8.1 : Dimensions et propriétés mécaniques de la dalle.

Dimensions des dalles (mm * mm*mm)	Module d'élasticité de la dalle (GPa)	Densité de la dalle (kg/m3)	Coefficient de Poisson de la dalle
4000 * 2000 *200	30	2500	0,2

### 8.1.2 Étude pour différentes tailles du défaut

L'étude permet de montrer l'impact de la largeur du défaut sur la réponse vibratoire et sur le choix des paramètres de traitement de l'approche développée.

Pour cette étude, considérons quatre cas d'étude dont les caractéristiques sont consignées dans le **Tableau 8.2** :

- Une dalle avec un défaut de dimensions 800 mm \* 800 mm \* 0,2 mm ;
- Une dalle avec un défaut de dimensions 1000 mm \* 1000 mm \* 0,2 mm ;
- Une dalle avec un défaut de dimensions 1500 mm \* 1500 mm \* 0,2 mm ;
- Une dalle avec un défaut de dimensions 1800 mm \* 1800 mm \* 0,2 mm.

Tableau 8.2 : Étude par rapport à la taille du défaut

Dimensions des dalles (mm * mm*mm)	Dimensions des defauts (mm * mm*mm)	Profondeur du défaut sous la dalle (cm)	Module d'élasticité de la dalle (cm)	Densité de la dalle (kg/m3)	Coefficient de Poisson de la dalle
4000 * 2000 *200	800 * 800 * 0,2	5	30	2500	0,2
4000 * 2000 *200	1000 * 1000 * 0,2				
4000 * 2000 *200	1500* 1500 * 0,2				
4000 * 2000 *200	1800 * 1800 * 0,2				

Nous n'allons plus décrire les cas d'étude de défauts de dimensions :

- 1000 mm \* 1000 mm \* 0,2 mm ;
- 1500 mm \* 1500 mm \* 0,2 mm.

Les résultats de ces deux cas d'études ont été présentés au chapitre 7 (paragraphe 7.2). Ces résultats serviront de comparaison aux autres études.

### 8.1.3 Étude pour différentes profondeurs du défaut

Pour différentes profondeurs du défaut dans la dalle, l'étude permet de montrer l'impact de ce paramètre sur la réponse vibratoire et sur le choix des paramètres de traitement de l'approche développée. Pour cette étude, considérons quatre cas d'étude des dalles avec un défaut de dimensions :

- 1000 mm \* 1000 mm \* 0,2 mm placé à 50 mm de profondeur ;
- 1000 mm \* 1000 mm \* 0,2 mm placé à 100 mm de profondeur ;
- 1800 mm \* 1800 mm \* 0,2 mm placé à 50 mm de profondeur ;
- 1800 mm \* 1800 mm \* 0,2 mm placé à 150 mm de profondeur.

Les caractéristiques de la dalle sont décrites dans le **Tableau 8.3**. Nous n'allons plus décrire les cas d'étude de défauts de dimensions :

- 1000 mm \* 1000 mm \* 0,2 mm placé à 50 mm de profondeur ;
- 1800 mm \* 1800 mm \* 0,2 mm placé à 50 mm de profondeur.

Les résultats de ces deux cas d'études ont été présentés au chapitre 7 (paragraphe 7.2) et au chapitre 8 (paragraphe 8.2). Ces résultats serviront de comparaison aux autres études.

Tableau 8.3 : Étude par rapport à la profondeur du défaut

Dimensions des dalles (mm * mm*mm)	Dimensions des défauts (mm*mm*mm)	Profondeur des défauts sous les dalles (cm)	Module d'élasticité des dalles (GPa)	Densité des dalles (kg/m3)	Coefficient de Poisson des dalles
4000 * 2000 *200	1000 * 1000 * 0,2	5	30	2500	0,2
4000 * 2000 *200	1000 * 1000 * 0,2	10			
4000 * 2000 *200	1800 * 1800 * 0,2	5			
4000 * 2000 *200	1800 * 1800 * 0,2	15			

#### 8.1.4 Étude par rapport à la nature de la source d'excitation

Les caractéristiques de la dalle étudiée sont consignées dans l'annexe A.1, **Tableau A.1**. Nous avons considéré une dalle avec un défaut de dimensions de 40 cm \* 40 cm \* 0,2 mm. Pour ce type de défaut, nous avons utilisé deux types de fréquences d'excitation :

- Une fréquence d'excitation de 1000 Hz ;
- Une fréquence d'excitation de 2000 Hz.

Le but de l'étude est de montrer la pertinence de chaque fréquence d'excitation en termes de détection pour des défauts dont le diamètre est inférieur ou égal à 40 cm \* 40 cm.

#### 8.1.5 Étude pour différentes positions du défaut dans la dalle

Les caractéristiques de la dalle étudiée sont consignées à l'annexe (**Annexe A.1, Tableau A.2**). Pour cette étude, nous avons considéré un défaut de dimensions de 180 cm \* 180 cm \* 0,2 mm excentré c'est-à-dire non situé au centre de la dalle. Le but de l'étude est de montrer l'impact de la position du défaut sur la réponse vibratoire. En effet, en changeant la position du défaut dans la dalle nous voulions savoir si sa fréquence propre de vibration (premier mode) varie ou pas à partir de l'analyse modale et de pouvoir valider l'approche développée en termes de détection et d'estimation de ses caractéristiques (diamètre et profondeur).

### 8.1.6 Étude pour une dalle à multi-défauts

Les caractéristiques de la dalle sont à l'annexe (**Annexe A.1, Tableau A.3**). Nous avons considéré une dalle constituée de trois défauts de dimensions de dimensions respectives de 60 cm \* 60 cm \* 0,2 mm, 100 cm \* 100 cm \* 0,2 mm et 80 cm \* 80 cm \* 0,2 mm. L'étude a pour but de montrer que, quel que soit le nombre de défauts dans une dalle, chaque défaut vibre selon sa fréquence propre. Ainsi, un défaut de dimensions données dans une dalle à multi-défauts ou seul dans une dalle, vibre-t-il à la même fréquence propre ? Quelle est la fiabilité de l'approche développée à détecter et à estimer les caractéristiques de chaque défaut dans une dalle à plusieurs défauts ?

## 8.2 Présentation des résultats de l'étude paramétrique

Les résultats de validation sont représentés sous forme de cartographies :

- Cartographies d'analyse modale ;
- Cartographies selon l'approche développée ;
- Cartographies selon l'approche conventionnelle définie selon la norme *ASTM C 1470* [23] ;
- Cartographies de l'approche dite « arithmétique ».

### 8.2.1 Cartographies d'analyse modale

Le but de l'étude est de montrer et distinguer dans le cas des dalles avec défauts les modes globaux et les modes locaux. Bien que plusieurs modes locaux existent (premier ordre, deuxième ordre, etc.), l'intérêt de l'étude portera principalement sur le mode de vibration de premier ordre, car c'est à partir de ce mode que portera le calcul de l'estimation de la profondeur du défaut. Nous présenterons dans les résultats quelques modes de vibration des dalles ainsi que leurs fréquences propres associées :

- Dans le cas d'étude d'une dalle saine sans défaut, l'analyse modale montre que la dalle vibre entièrement en mode global, quelle que soit la fréquence (**Figure 8.2**). On ne distingue aucun mode local.

- Dans le cas d'étude des dalles avec défauts, on distingue clairement les modes globaux des modes locaux où seuls les défauts vibrent, d'après les résultats :
  - Étude pour différentes largeurs. Étude d'un défaut de dimensions 80 cm \* 80 cm \* 0,2 mm (**Figure 8.7**) et d'un défaut de dimensions 180 cm \* 180 cm \* 0,2 mm (**Figure 8.18**) ;
  - Étude pour différentes profondeurs. Étude d'un défaut de dimensions 100 cm \* 100 cm \* 0,2 mm placé à 10 cm de profondeur (**Figure 8.27**) et d'un défaut de dimensions 180 cm \* 180 cm \* 0,2 mm placé à 15 cm de profondeur (**Figure 8.38**) ;
  - Étude par rapport à la fréquence d'excitation de la source (**Annexe A.1, Figure A.6**) ;
  - Étude par rapport à une structure à multidéfauts (**Annexe A.1, Figure A.17**).

### 8.2.2 Cartographies selon l'approche développée

L'étude paramétrique de validation de l'approche développée consiste à partir de l'analyse des différents paramètres définis dans le programme d'élaborer les cartographies de détection, d'estimation du diamètre et de la profondeur du défaut. Le but de l'étude est de mieux comprendre le choix et l'impact de ces paramètres sur le fonctionnement de l'approche.

Les cartographies de détection du défaut sont des cartographies après traitement (suppression des modes globaux) présentent encore soit des modes globaux, soit des modes locaux (cas des cartographies issues de la sommation de toutes fréquences de vibration de la structure). Les cartographies de détection notamment les cartographies issues de la sommation de toutes les fréquences de vibration donnent plus de précision par rapport à l'extension du défaut dans la dalle. Les cartographies d'estimation du diamètre et de la profondeur des défauts sont des cartographies de vibration locale où seul le défaut vibre.

Dans notre étude paramétrique, nous avons deux types d'analyses (analyse 1 et analyse 2) dans le but de montrer l'importance du choix des paramètres de traitement dans la validation de l'approche développée. Les paramètres d'analyse sont consignés dans les tableaux (**Tableaux 8.4, 5, 6, 7, 8**) selon le type de paramètres étudiés. Dans les deux analyses, le paramètre de seuil de détection de pics, le paramètre de résolution et le paramètre de seuil de mobilité d'affichage d'image sont fixes. Seul le paramètre d'émergence varie entre les deux

analyses, car c'est le paramètre qui a le plus d'effet sur l'élaboration des cartographies de mode de vibration et principalement sur la cartographie associée au premier mode de vibration des défauts qui permet d'estimer leur diamètre et par la suite leur profondeur selon l'hypothèse établie par l'approche développée.

- **Étude pour une dalle saine sans défauts, dalle de référence**

Tableau 8.4 : Paramètres d'analyse de l'approche développée, pour le cas d'une dalle saine.

Analyses	Paramètre ou seuil de détection des pics (paramètre relatif en %)	Paramètre de résolution (paramètre absolu en Hz)	Paramètre d'émergence d'image (paramètre absolu)	Seuil de mobilité d'affichage d'image (paramètre relatif en %)
Analyse 1	Epsilon	1	1	0.00
Analyse 2			10	

- **Étude pour différentes largeurs ou différents diamètres du défaut**

Tableau 8.5 : Paramètres d'analyse de l'approche développée – Défaut de dimensions : 80 cm \* 80 cm \* 0,2 mm.

Analyses	Paramètre ou seuil de détection des pics (paramètre relatif en %)	Paramètre de résolution (paramètre absolu en Hz)	Paramètre d'émergence d'image (paramètre absolu)	Seuil de mobilité d'affichage d'image (paramètre relatif en %)
Analyse 1	Epsilon	60	1	0.00
Analyse 2			10	

Tableau 8.6 : Paramètres d'analyse de l'approche développée – Défaut de dimensions :  
180 cm \* 180 cm \* 0,2 mm.

Analyses	Paramètre ou seuil de détection des pics (paramètre relatif en %)	Paramètre de résolution (paramètre absolu en Hz)	Paramètre d'émergence d'image (paramètre absolu)	Seuil de mobilité d'affichage d'image (paramètre relatif en %)
Analyse 1	Epsilon	90	1	0.00
Analyse 2			4	

- **Étude pour différentes profondeurs du défaut**

Tableau 8.7 : Paramètres d'analyse de l'approche développée – Défaut de dimensions :  
80 cm \* 80 cm \* 0,2 mm placé à 10 cm de profondeur.

Analyses	Paramètre ou seuil de détection des pics (paramètre relatif en %)	Paramètre de résolution (paramètre absolu en Hz)	Paramètre d'émergence d'image (paramètre absolu)	Seuil de mobilité d'affichage d'image (paramètre relatif en %)
Analyse 1	Epsilon	80	2.5	0.00
Analyse 2	Epsilon		3.5	0.00

Tableau 8.8 : Paramètres d'analyse de l'approche développée – Défaut de dimensions : 180 cm \* 180 cm \* 0,2 mm placé à 15 cm de profondeur.

Analyses	Paramètre ou seuil de détection des pics (paramètre relatif en %)	Paramètre de résolution (paramètre absolu en Hz)	Paramètre d'émergence d'image (paramètre absolu)	Seuil de mobilité d'affichage d'image (paramètre relatif en %)
Analyse 1	Epsilon	100	1.1	0.00
Analyse 2	Epsilon		2	0.00

Les cartographies fournies à partir de ces paramètres d'analyse sont :

➤ **Cartographies pour la détection.**

Ces cartographies permettent dans le cas notamment des dalles avec un défaut de détecter sa position et son extension dans la dalle. Dans ces cartographies, nous allons voir que non seulement le défaut vibre, mais d'autres composantes de la dalle y vibrent également. Les résultats de l'étude paramétrique sont :

- Cas de la dalle saine (**Figures 8.2 et 8.3**) ;
- Cas de la dalle avec un défaut. Étude pour différentes largeurs du défaut : Études pour un défaut de dimensions 80 cm \* 80 cm \* 0,2 mm à partir de l'analyse 1 (**Figures 8.8, 9, 10**) et de l'analyse 2 (**Figure 8.11**). Étude pour un défaut de dimensions 180 cm \* 180 cm \* 0,2 mm à partir de l'analyse 1 (**Figures 8.18, 19**) et de l'analyse 2 (**Figure 8.20**) ;
- Cas de la dalle avec un défaut. Étude pour différentes profondeurs du défaut : Étude pour un défaut de dimensions 100 cm \* 100 cm \* 0,2 mm placé à 10 cm de profondeur à partir de l'analyse 1 (**Figures 8.27, 28, 29, 30**) et de l'analyse 2 (**Figure 8.31, 32, 33, 34**). Étude pour un défaut de dimensions 180 cm \* 180 cm \* 0,2 mm placé à 15 cm de profondeur à partir de l'analyse 1 (**Figures 8.38, 39, 40**) et de l'analyse 2 (**Figure 8.41, 42, 43**) ;
- Cas de la dalle avec un défaut. Étude par rapport à la fréquence d'excitation de la source (**Annexe A.1, Figure A.7**) ;



- Cas de la dalle avec un défaut. Étude par rapport à la position du défaut (**Annexe A.1, Figure A.13**) ;
- Cas de la dalle avec un défaut. Étude par rapport à une structure à multi-défauts (**Annexe A.1, Figures A.18, 19, 20, 21, 22**).

➤ **Cartographies pour l'estimation du diamètre et de la profondeur du défaut.**

Ces cartographies sont utilisées pour le calcul de l'estimation du diamètre et de la profondeur du défaut selon les deux approches d'évaluation proposées au chapitre 6.

- **Résultats selon la première approche :**
  - Cas de la dalle avec un défaut. Étude pour différentes largeurs du défaut : Études pour un défaut de dimensions 80 cm \* 80 cm \* 0,2 mm à partir de l'analyse 2 et pour un défaut de dimensions 180 cm \* 180 cm \* 0,2 mm à partir de l'analyse 2 ;
  - Cas de la dalle avec un défaut. Étude pour différentes profondeurs du défaut : Étude pour un défaut de dimensions 100 cm \* 100 cm \* 0,2 mm placé à 10 cm de profondeur à partir de l'analyse 1 (**Figure 8.28**) et de l'analyse 2 (**Figure 8.32**) ;
  - Cas de la dalle avec un défaut. Étude par rapport à la fréquence d'excitation de la source (**Annexe A.1, Figures A.8**) ;
  - Cas de la dalle avec un défaut. Étude par rapport à la position du défaut (**Annexe A.1, Figure A.14**).
- **Résultats selon la deuxième approche proposée :**
  - Cas de la dalle avec un défaut. Étude pour différentes largeurs du défaut : Études pour un défaut de dimensions 80 cm \* 80 cm (**Figures 8.13, 14**) et pour un défaut de dimensions 180 cm \* 180 cm (**Figures 8.22, 23**) ;
  - Cas de la dalle avec un défaut. Étude pour différentes profondeurs du défaut : Étude pour un défaut de dimensions 100 cm \* 100 cm \* 0,2 mm placé à 10 cm de profondeur à partir de l'analyse 1 (**Figures 8.29, 30**) et de l'analyse 2 (**Figures 8.33, 34**).

### 8.2.3 Cartographies selon l'approche conventionnelle

Les cartographies sont élaborées selon la norme ASTM C 1470 [23]. Le principe et la théorie de l'approche conventionnelle de la méthode de la RI ont été développés dans le chapitre 4. Il s'agit des cartographies de :

- La mobilité moyenne ;
- La rigidité dynamique ;
- La pente de la mobilité ;
- L'indice du vide (rapport entre la mobilité moyenne et le pic de mobilité maximal entre 0 et 100 Hz).

Le but de cette étude est de comparer les résultats obtenus en termes notamment de détection et de localisation avec ceux de l'approche développée dans ce programme. Cette comparaison permettra donc de valider l'approche développée. Les mêmes données utilisées avec l'approche développée ont donc été appliquées sur l'approche conventionnelle. Les résultats cartographiques obtenus sont tels que :

- Cas de la dalle saine (**Figure 8.5**) ;
- Cas de la dalle avec un défaut. Étude pour différentes largeurs du défaut : Études pour un défaut de dimensions 80 cm \* 80 cm (**Figure 8.15**) et un défaut de dimensions 180 cm \* 180 cm (**Figure 8.24**) ;
- Cas de la dalle avec un défaut. Étude pour différentes profondeurs du défaut. Études pour un défaut de dimensions 100 cm \* 100 cm \* 0,2 mm placé à 10 cm de profondeur (**Figure 8.35**) et pour un défaut de dimensions 180 cm \* 180 cm \* 0,2 mm placé à 15 cm de profondeur (**Figure 8.44**) ;
- Cas de la dalle avec un défaut. Étude par rapport à la fréquence d'excitation de la source : Étude pour un défaut de dimensions 40 cm \* 40 cm excité à une fréquence de 1000 Hz (**Annexe A.1, Figure A.4**) et pour le même défaut excité à une fréquence de 2000 Hz (**Annexe A.1, Figures A.9, A.10**) ;
- Cas de la dalle avec un défaut. Étude par rapport à la position du défaut (**Annexe A.1, Figure A.15**) ;

- Cas de la dalle avec un défaut. Étude par rapport à une structure à multi-défauts (**Annexe A.1, Figure A.23**).

#### 8.2.4 Cartographies selon l'approche dite « arithmétique »

Cette approche, très simple, est basée sur le calcul de la mobilité moyenne en faisant le quotient de la somme des mobilités dans une gamme de fréquences donnée par le nombre total de mobilités. C'est une autre approche que nous avons envisagée dans ce programme de thèse pour le traitement et l'analyse des données de la RI. L'utilisation de cette approche permettra de mesurer sa pertinence en comparaison à l'approche développée ou à l'approche conventionnelle en termes de détection du défaut.

Les mêmes données utilisées avec l'approche développée et l'approche conventionnelle ont donc été appliquées sur l'approche dite « arithmétique ». Les résultats cartographiques obtenus sont tels que :

- Cas de la dalle saine (**Figure 8.6**) ;
- Cas de la dalle avec un défaut. Étude pour différentes largeurs du défaut. Étude pour le défaut de dimensions 80 cm \* 80 cm \* 0,2 mm (**Figure 8.16**) et pour un défaut de dimensions 180 cm \* 180 cm \* 0,2 mm (**Figure 8.25**) ;
- Cas de la dalle avec un défaut. Étude pour différentes profondeurs du défaut. Étude pour défaut de dimensions 100 cm \* 100 cm \* 0,2 mm placé à 10 cm de profondeur (**Figure 8.36**) et pour un défaut de dimensions 180 cm \* 180 cm \* 0,2 mm placé à 15 cm de profondeur (**Figure 8.45**) ;
- Cas de la dalle avec un défaut. Étude par rapport à la fréquence d'excitation de la source : Étude pour un défaut de dimensions 40 cm \* 40 cm excité à une fréquence de 1000 Hz (**Annexe A.1, Figure A.5**) et pour le même défaut excité à une fréquence de 2000 Hz (**Annexe A.1, Figures A.11, 12**) ;
- Cas de la dalle avec un défaut. Étude par rapport à la position du défaut (**Annexe A.1, Figure A.16**) ;
- Cas de la dalle avec un défaut, étude par rapport à une structure à multi-défauts (**Annexe A.1, Figures A.24**).

## 8.3 Résultats de l'étude paramétrique

### 8.3.1 Étude d'une dalle saine - Dalle de référence

#### ➤ Résultats : Analyse modale

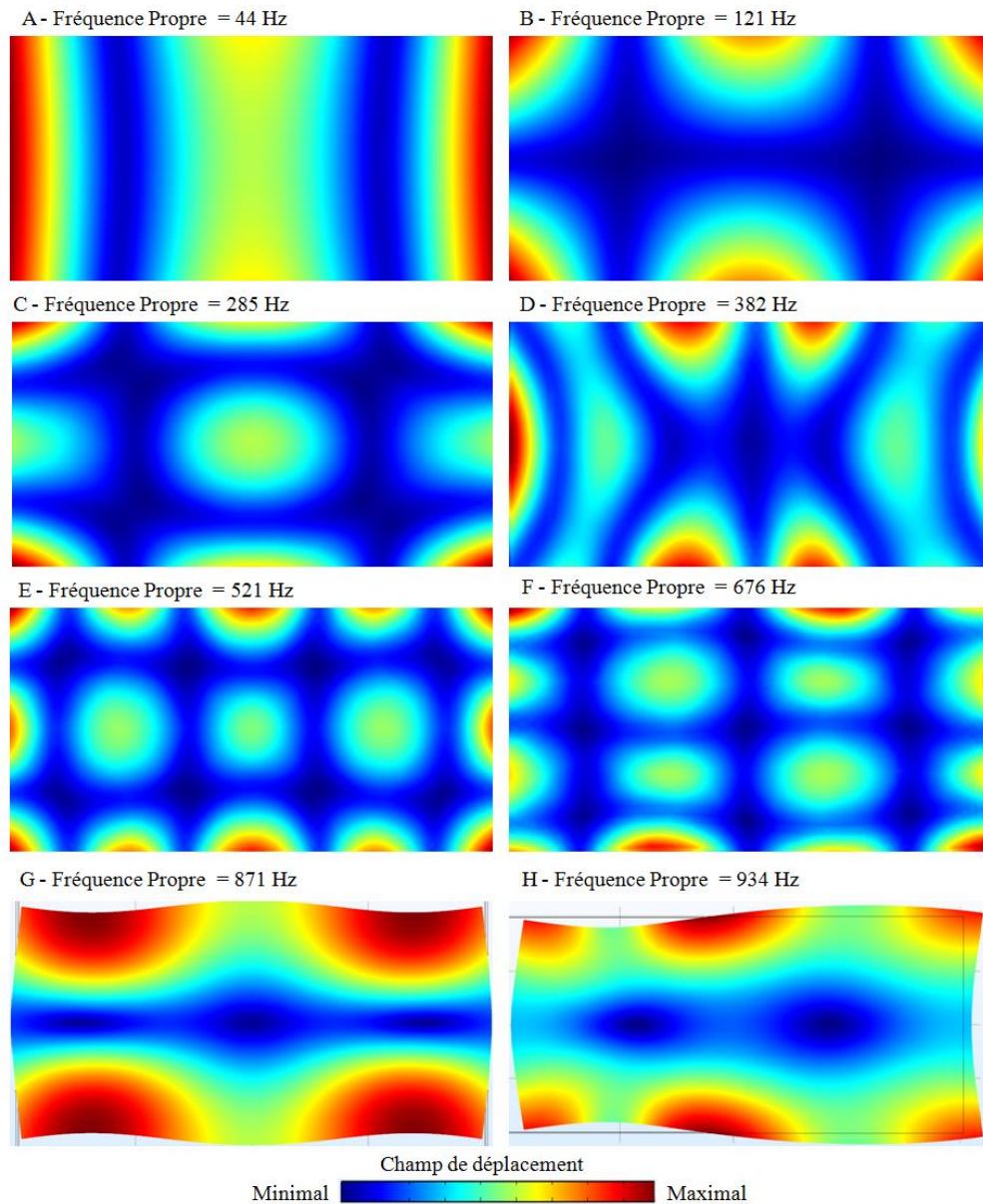


Figure 8.2 : Cartographie des modes propres – Dalle saine.

➤ **Résultats : Approche développée**

- **Résultat d'analyse 1 : Cartographie pour la détection**

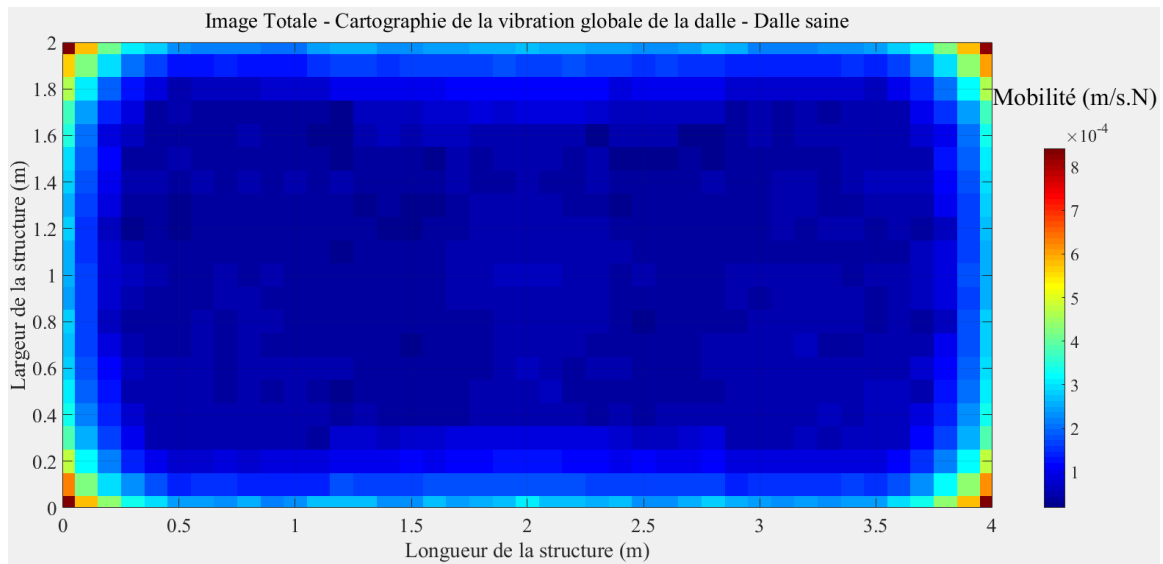


Figure 8.3 : Analyse 1 – Cartographie des mobilités – Dalle saine

- **Résultat d'analyse 2 : Cartographie pour la détection**

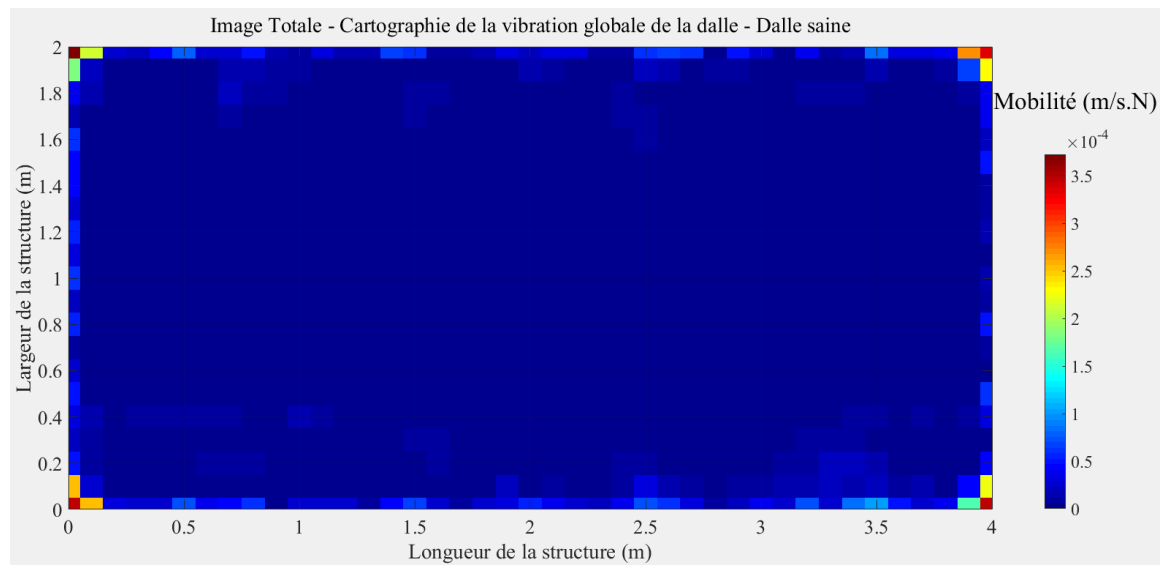


Figure 8.4 : Analyse 2 – Cartographie des mobilités – Cartographie de la vibration globale de la dalle – Dalle saine.

➤ **Résultats : Approche conventionnelle – RI**

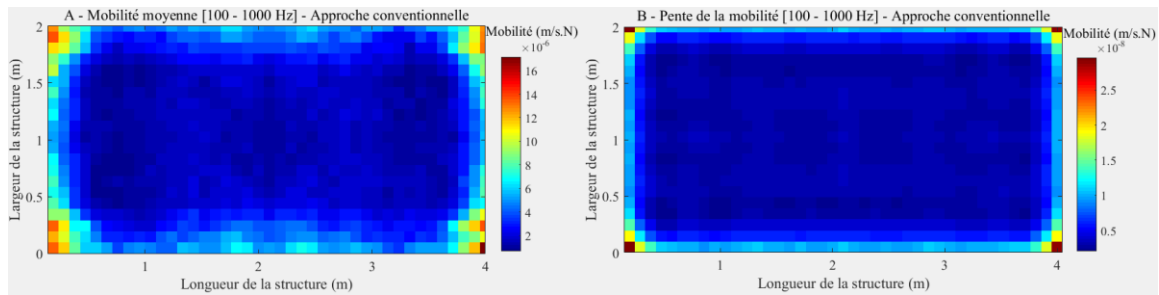


Figure 8.5 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilité moyenne - B : Pente de la mobilité.

➤ **Résultats : Approche « arithmétique » – RI**

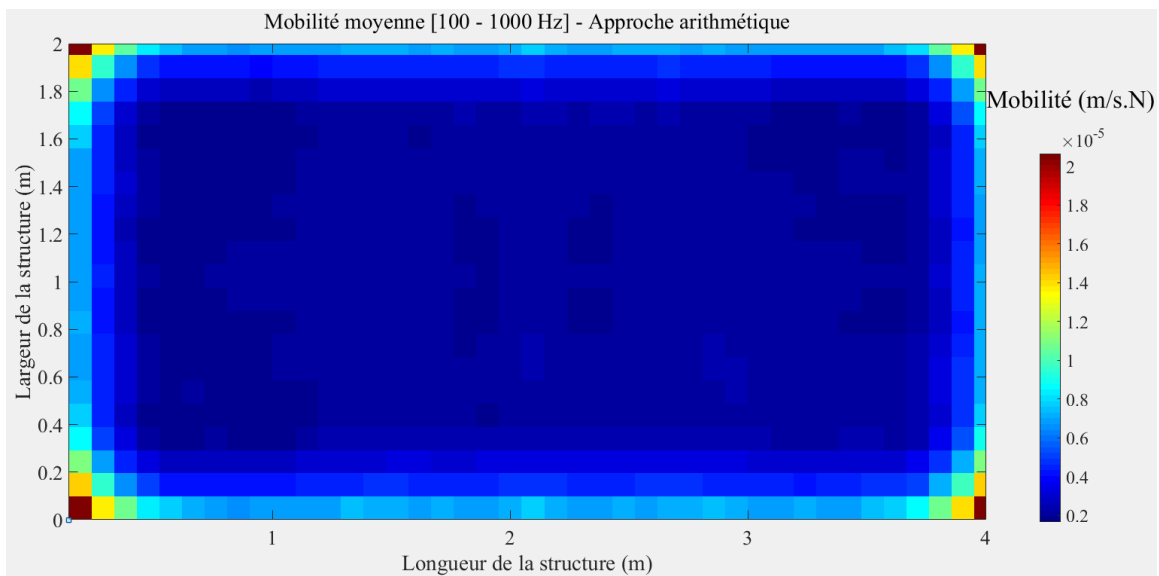


Figure 8.6 : Approche « arithmétique » – Mobilité moyenne.

### 8.3.2 Cas d'étude d'une dalle avec défaut - Étude pour différentes largeurs ou diamètres du défaut

#### 8.3.2.1 Étude pour une largeur du défaut = 800 mm \* 800 mm

➤ **Résultats : Analyse modale**

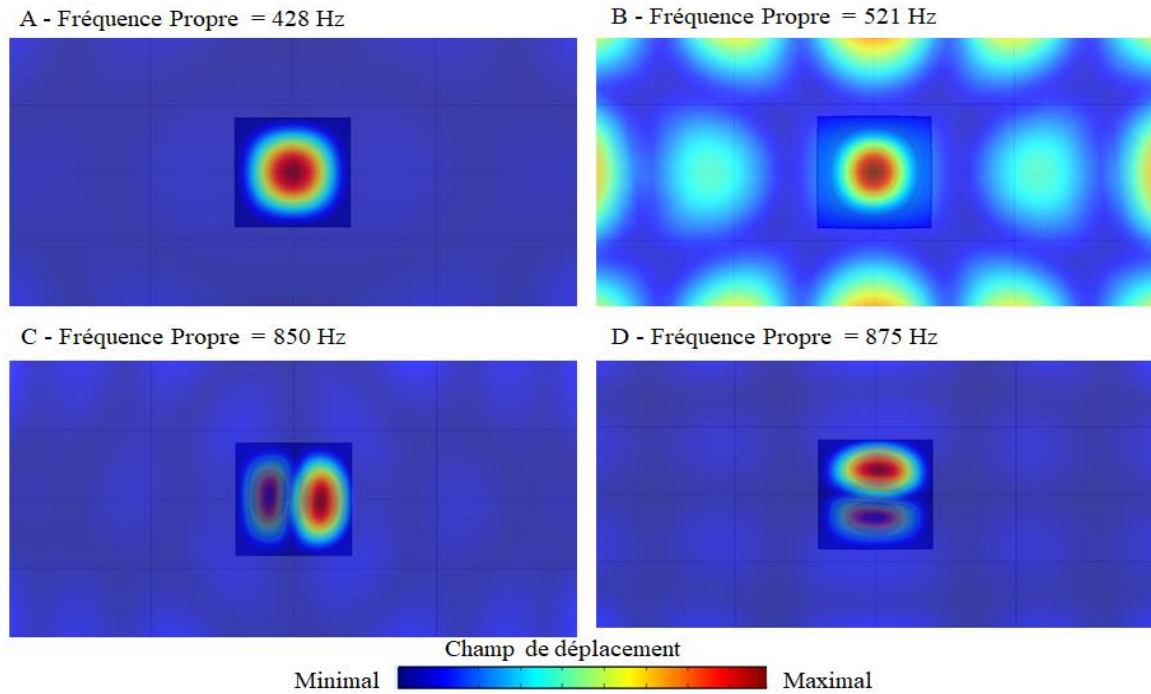


Figure 8.7 : Analyse modale – Cartographie des modes propres.

➤ **Résultats : Approche développée**

• **Résultats d'analyse 1 : Cartographies pour la détection**

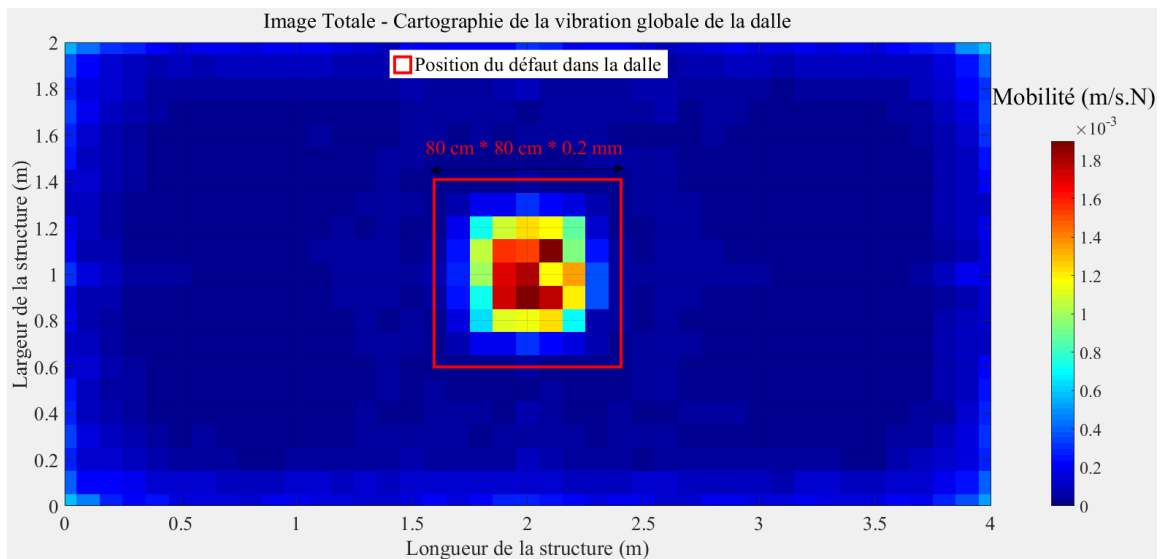


Figure 8.8 : Analyse 1 – Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection – Cartographie de la vibration globale de la dalle.

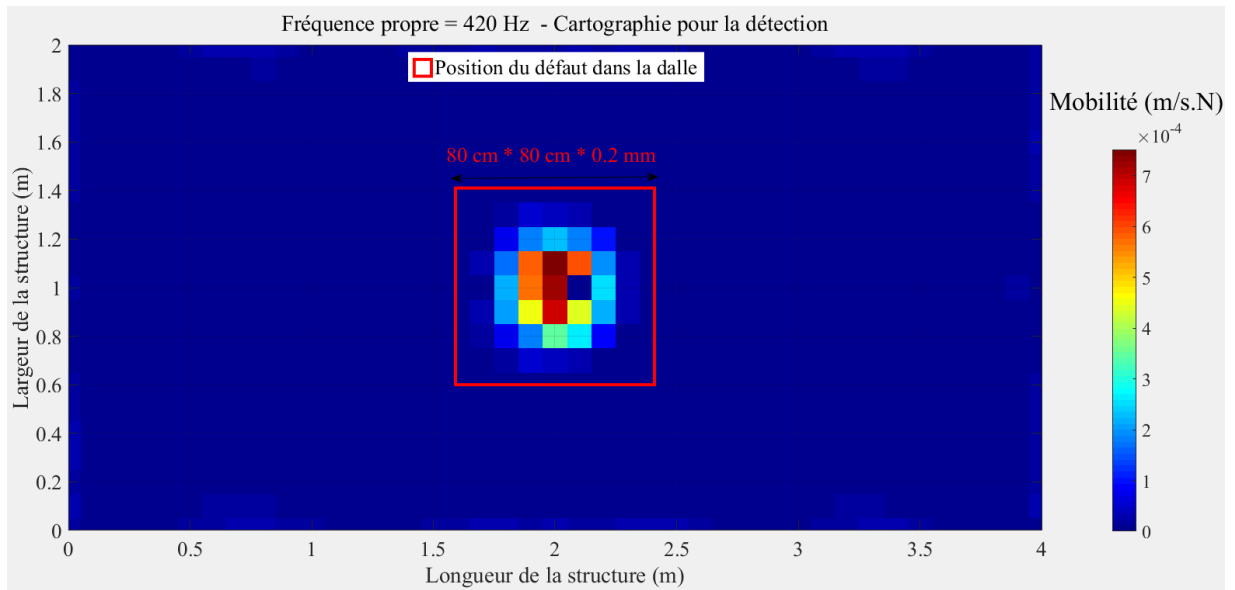


Figure 8.9 : Analyse 1 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 420 Hz.

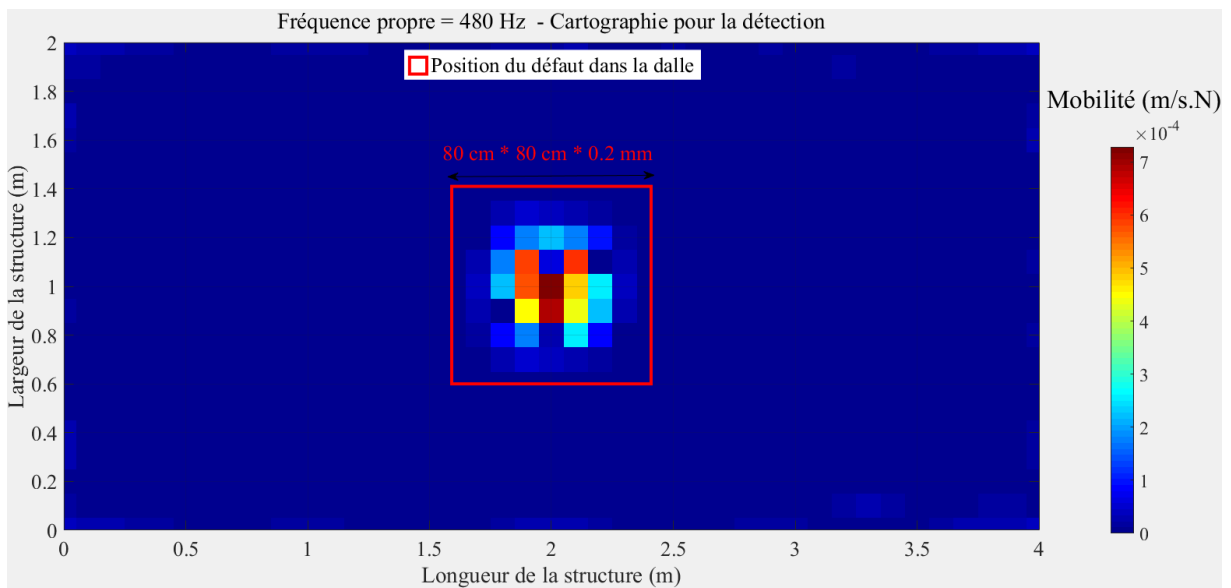


Figure 8.10 : Analyse 1 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 480 Hz.



- **Résultats d'analyse 2 : Cartographie pour la détection**

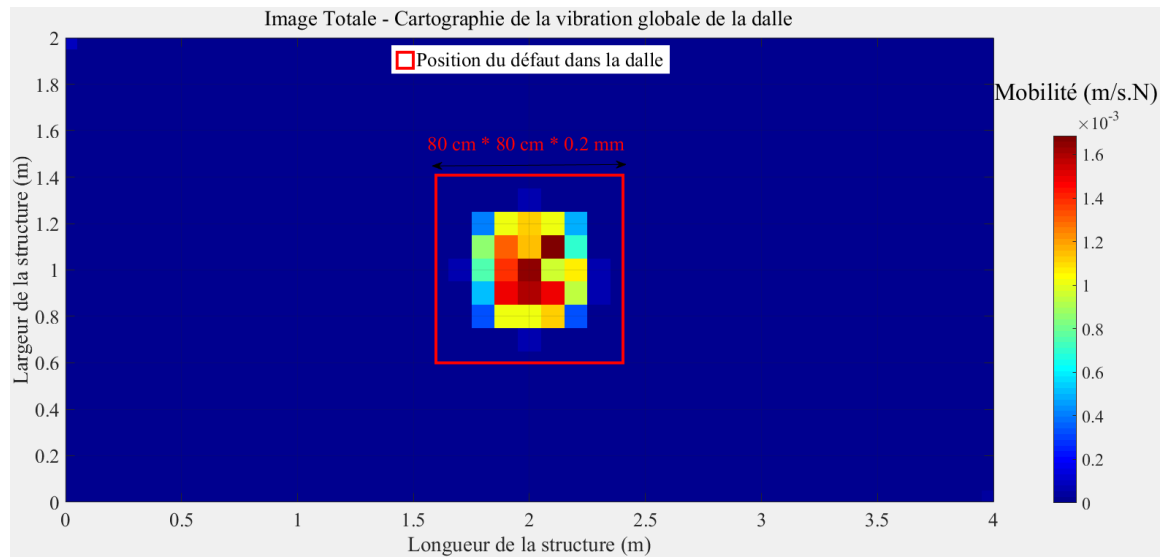


Figure 8.11 : Analyse 2 – Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection – Cartographie de la vibration globale de la dalle.

- **Résultats d'analyse 2 : Cartographies pour l'estimation du diamètre et de la profondeur du défaut**

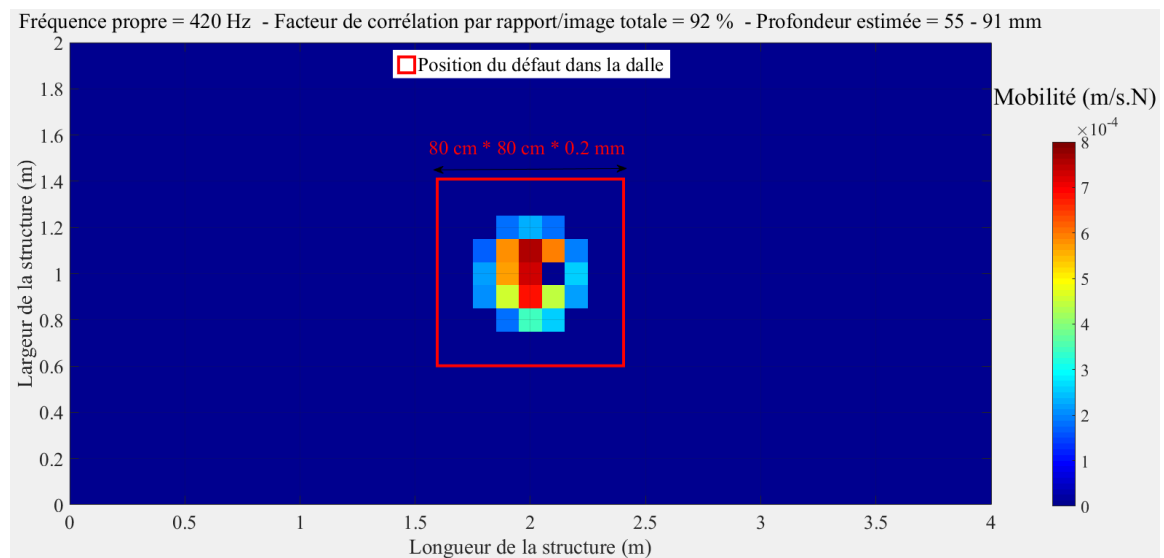


Figure 8.12 : Analyse 2 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour l'estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 420 Hz (mode 1).

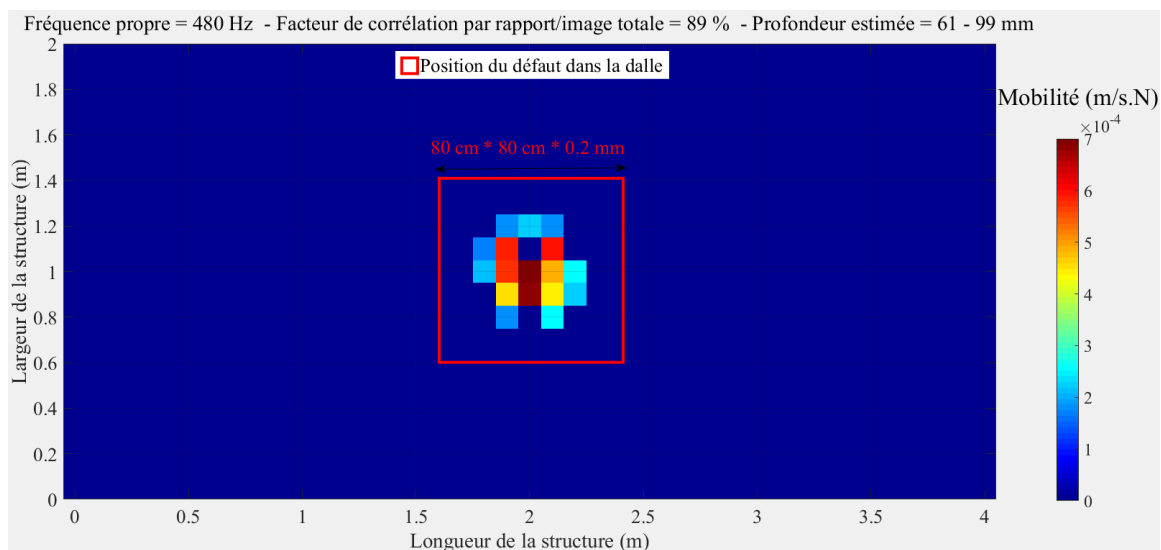


Figure 8.13 : Analyse 2 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour l’estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 480 Hz (mode 2).

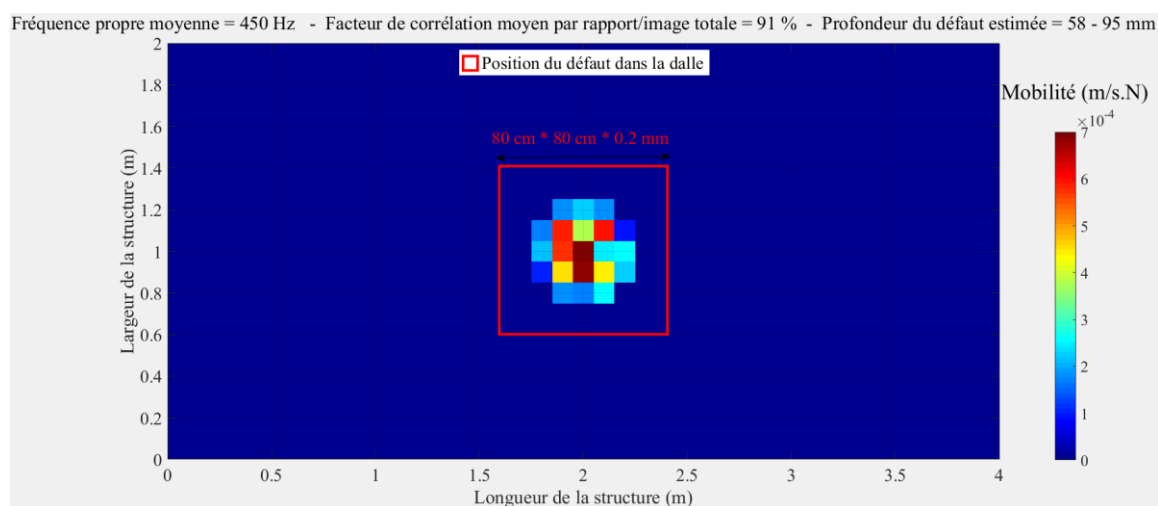


Figure 8.14 : Analyse 2 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour l’estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration moyenne de 450 Hz.

## ➤ Résultats : Approche conventionnelle - RI

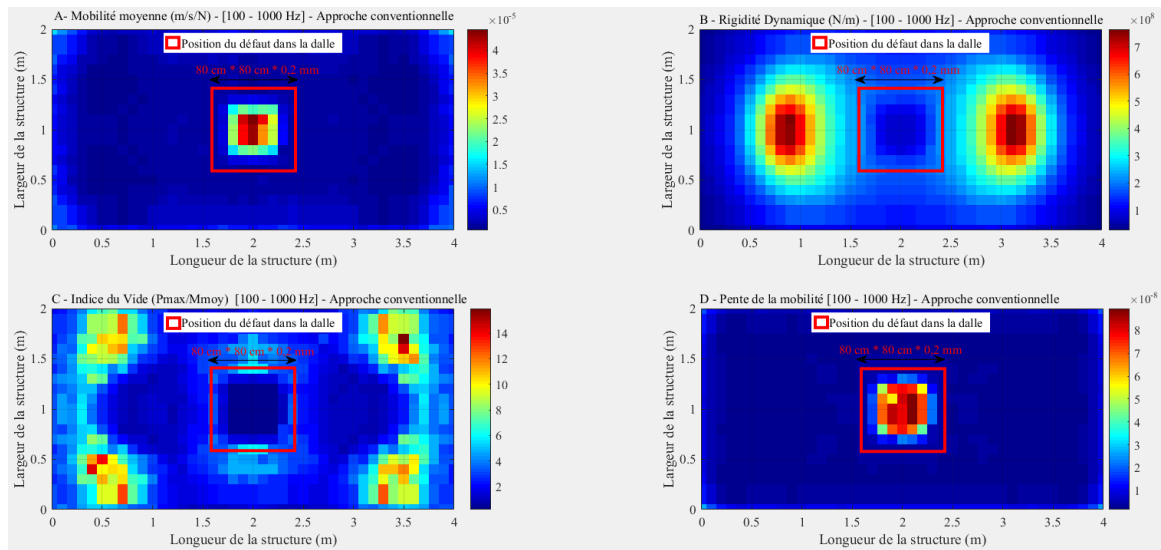


Figure 8.15 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes – B : Rigidité dynamique – C : Indice du vide – D : Pente de la mobilité.

## ➤ Résultats : Approche « arithmétique » – RI

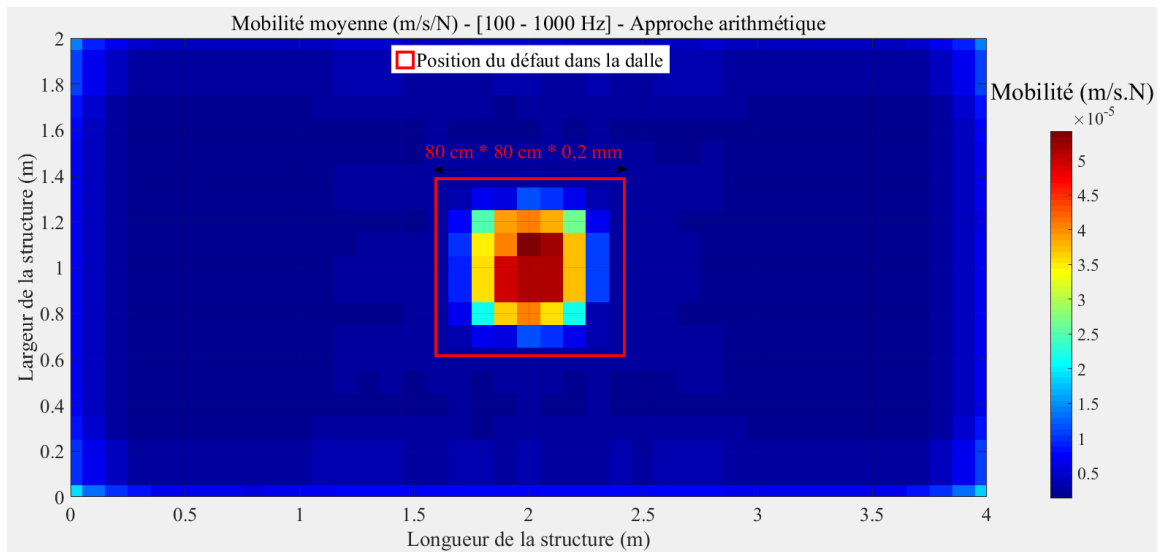


Figure 8.16 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes.

### 8.3.2.2 Étude pour une largeur du défaut = 1800 mm \* 1800 mm

#### ➤ Résultats : Analyse modale

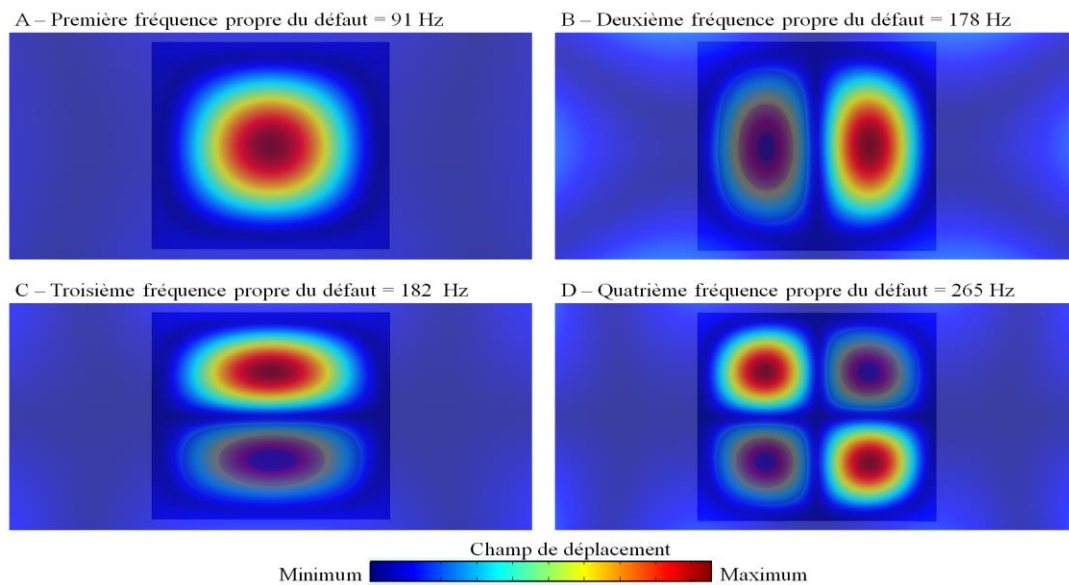


Figure 8.17 : Analyse modale – Cartographie des modes propres.

#### ➤ Résultats : Approche développée et analyse des paramètres

##### • Résultats d'analyse 1 : Cartographies pour la détection

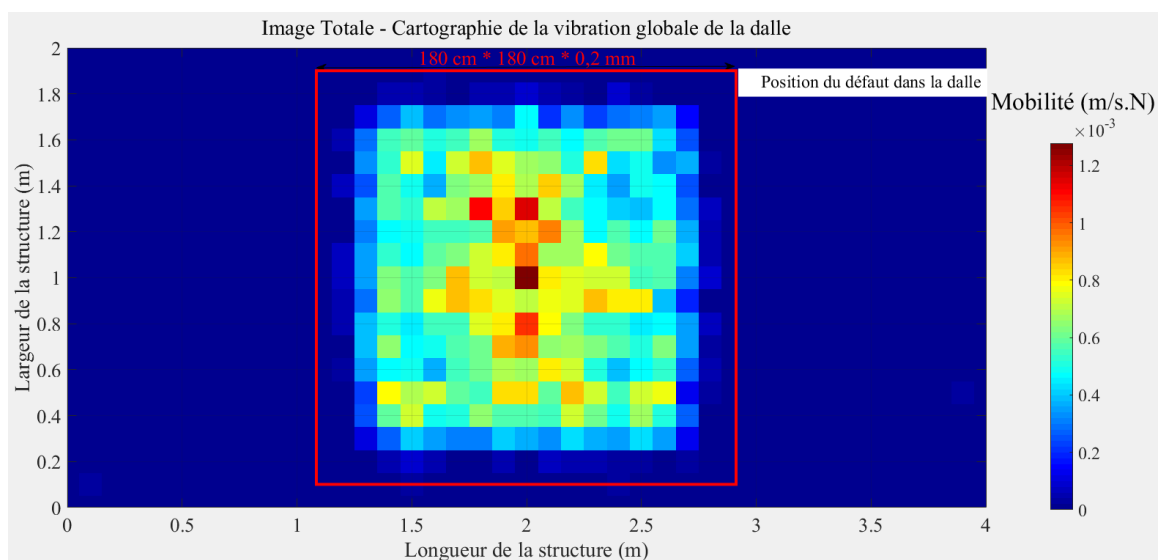


Figure 8.18 : Analyse 1 – Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection.

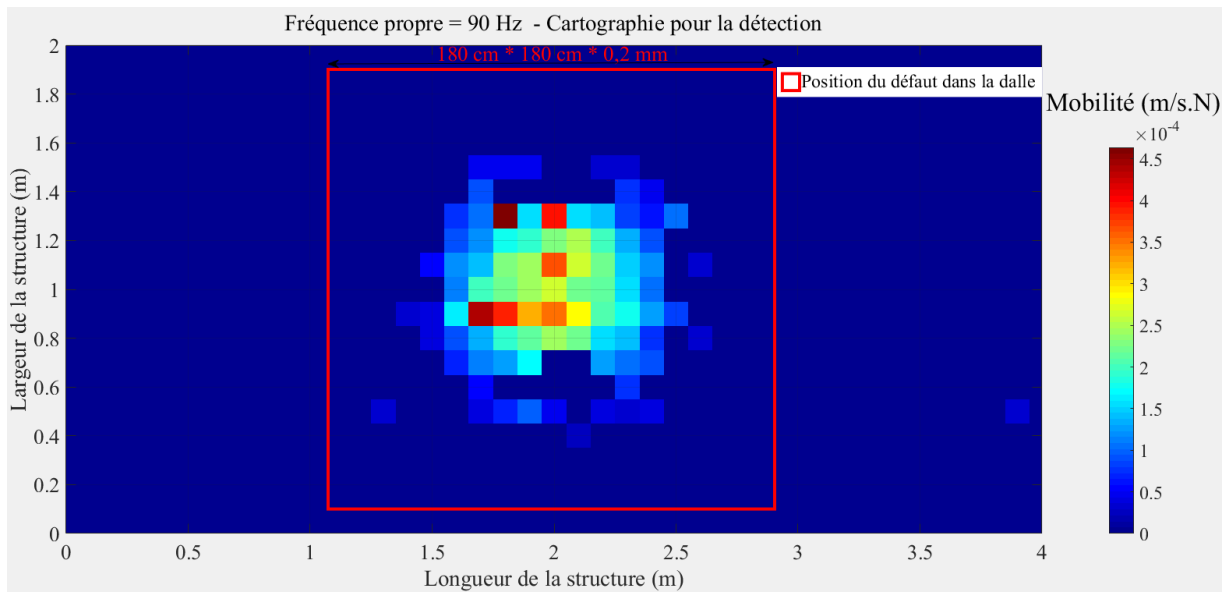


Figure 8.19 : Analyse 1 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 90 Hz.

- **Résultats d'analyse 2 : Cartographie pour la détection**

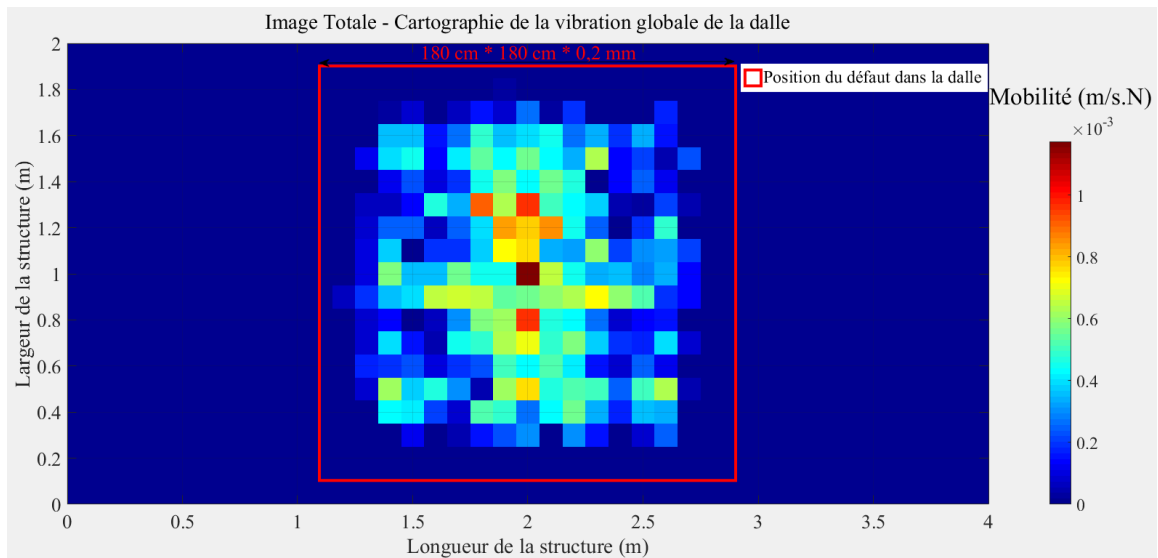


Figure 8.20 : Analyse 2 – Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection – Cartographie de la vibration globale de la dalle.

- **Résultats d'analyse 2 : Cartographies pour l'estimation du diamètre et de la profondeur du défaut**

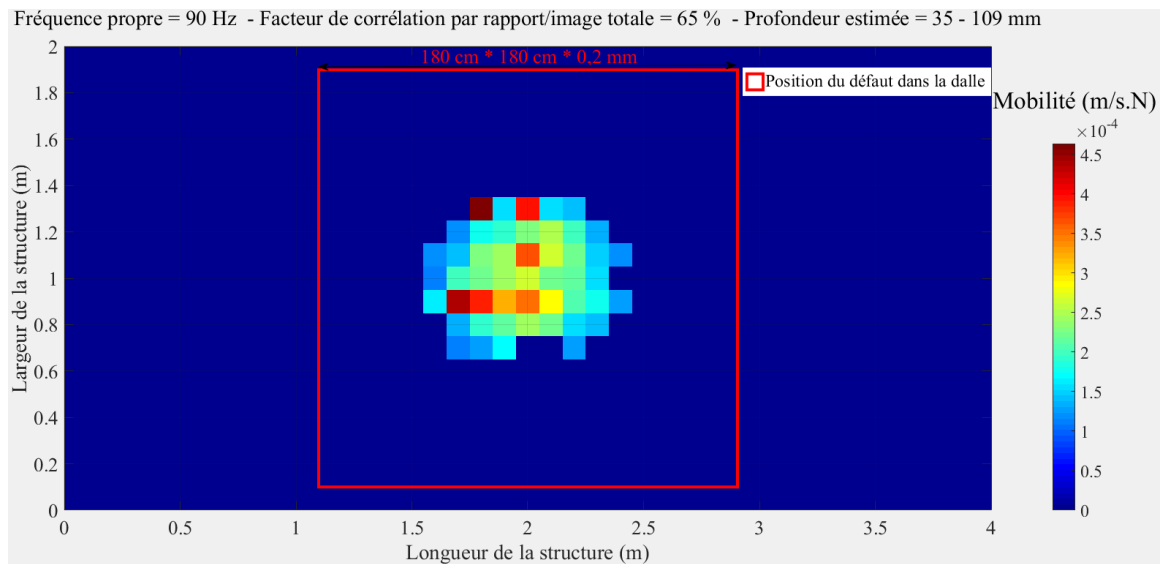


Figure 8.21 : Analyse 2 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour l'estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 90 Hz (mode 1).

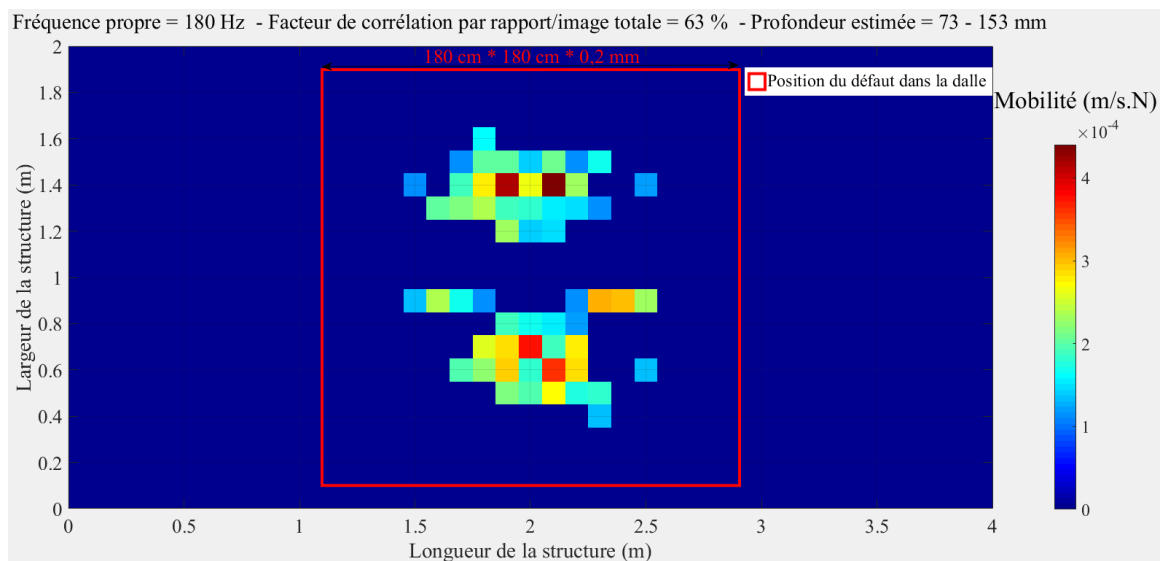


Figure 8.22 : Analyse 2 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour l'estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 180 Hz.

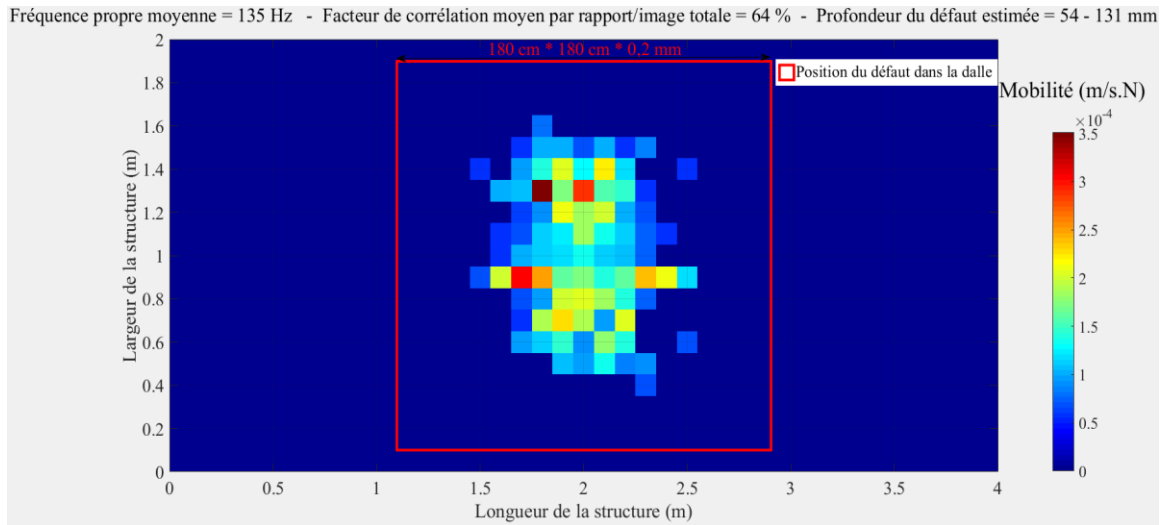


Figure 8.23 : Analyse 2 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour l’estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration moyenne de 135 Hz.

➤ **Résultats : Approche conventionnelle – RI**

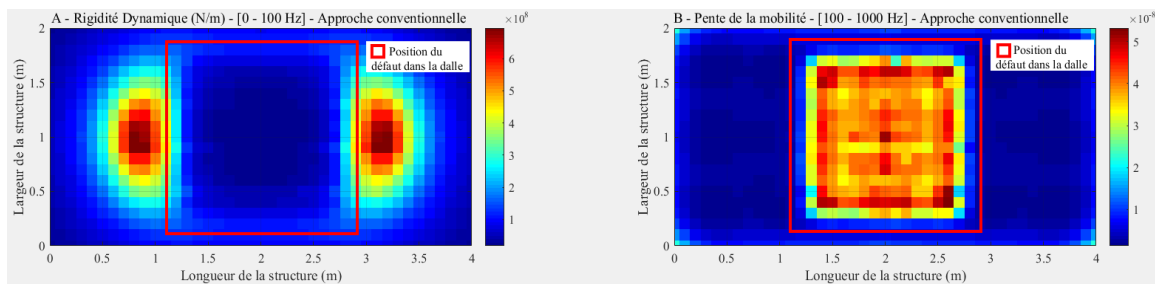


Figure 8.24 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Rigidité dynamique – B : Pente de la mobilité.

➤ **Résultats : Approche « arithmétique » – RI**

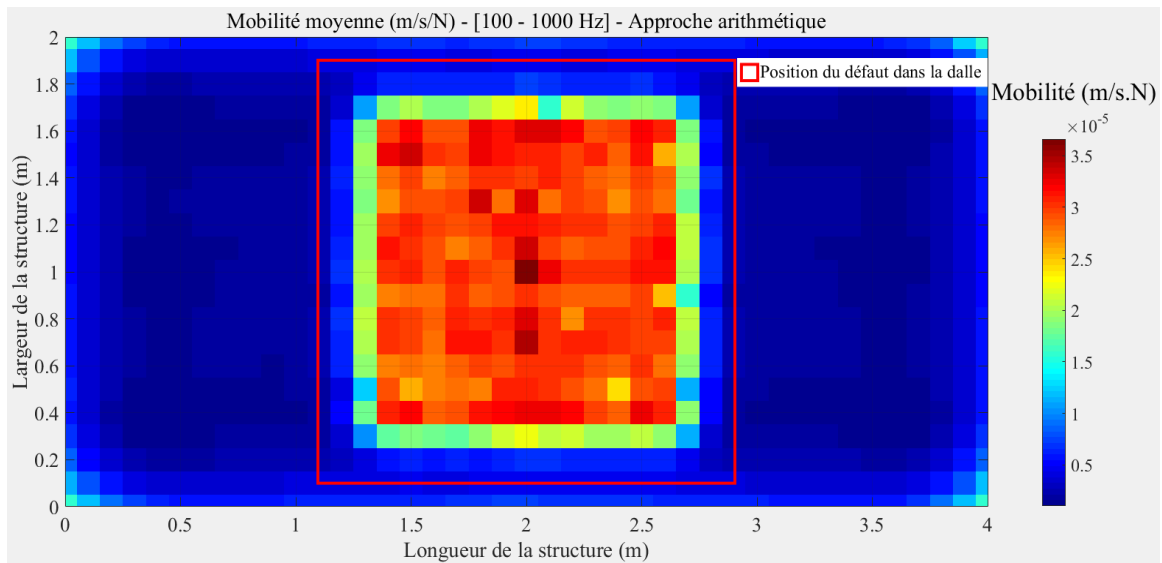


Figure 8.25 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes.

### 8.3.3 Cas d'étude d'une dalle avec défaut - Étude pour différentes profondeurs du défaut

#### 8.3.3.1 Étude pour le défaut de 1000 mm \* 1000 mm \* 0,2 mm placé à une profondeur = 100 mm

➤ **Résultats : Analyse modale**

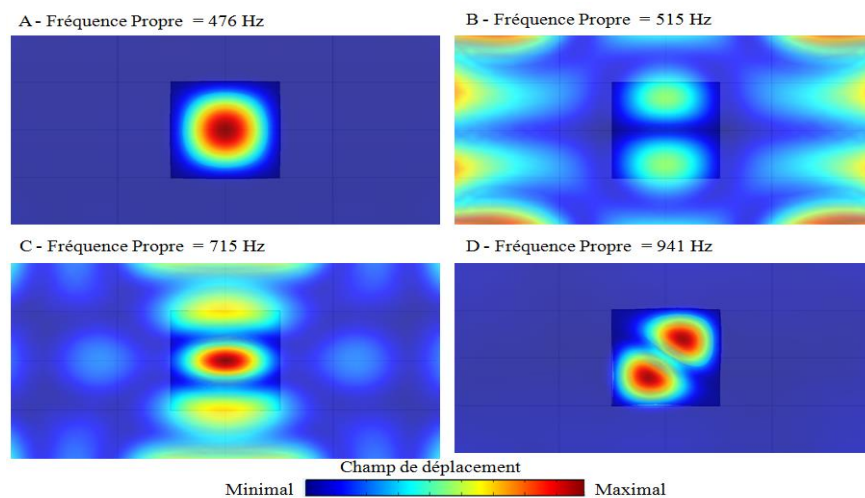


Figure 8.26 : Analyse modale – Cartographie des modes propres.



➤ **Résultats : Approche développée**

• **Résultats d'analyse 1 : Cartographie pour la détection**

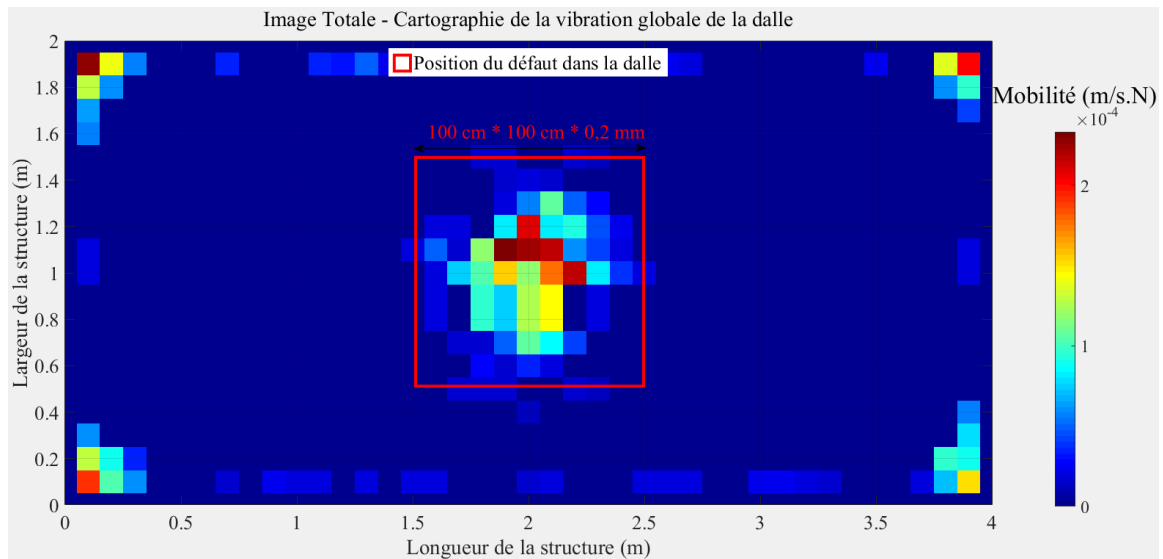


Figure 8.27 : Analyse 1 – Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection – Cartographie de la vibration globale de la dalle.

• **Résultats d'analyse 1 : Cartographies pour l'estimation du diamètre et de la profondeur du défaut**

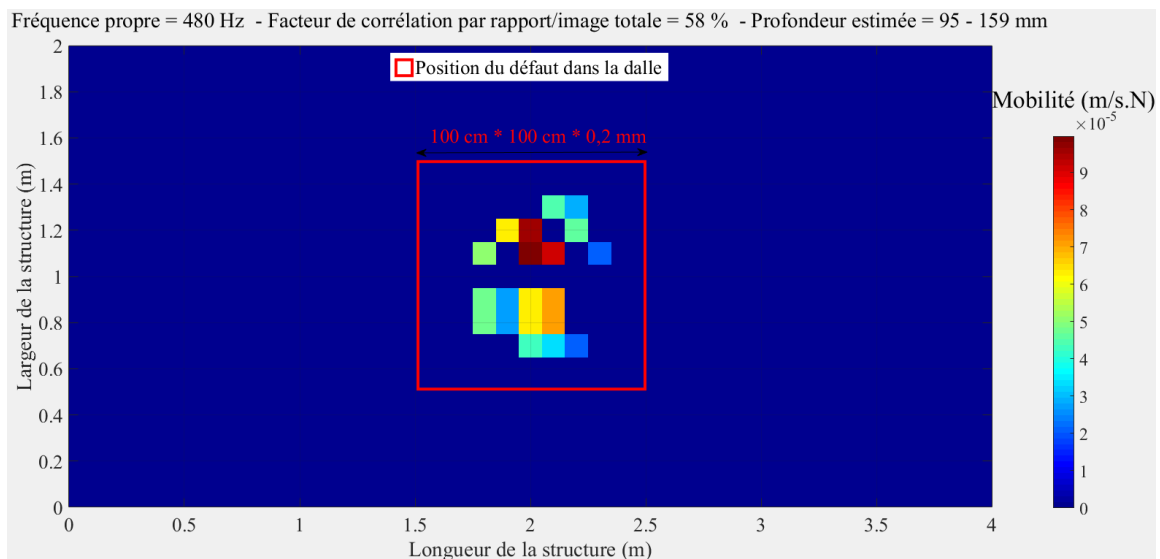


Figure 8.28 : Analyse 1 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour l'estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 480 Hz (mode 1).

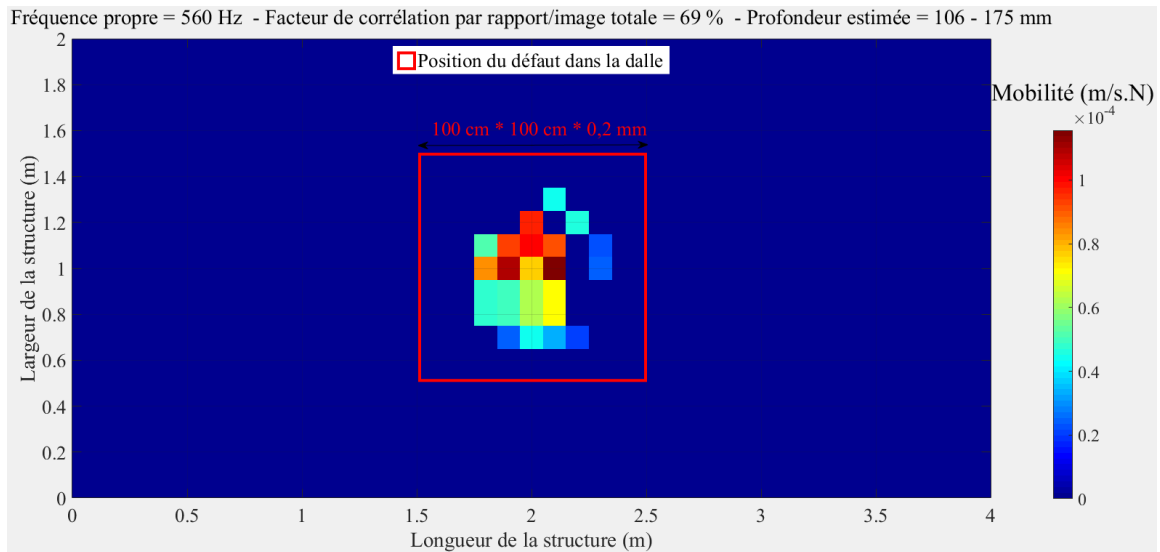


Figure 8.29 : Analyse 1 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour l’estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 560 Hz.

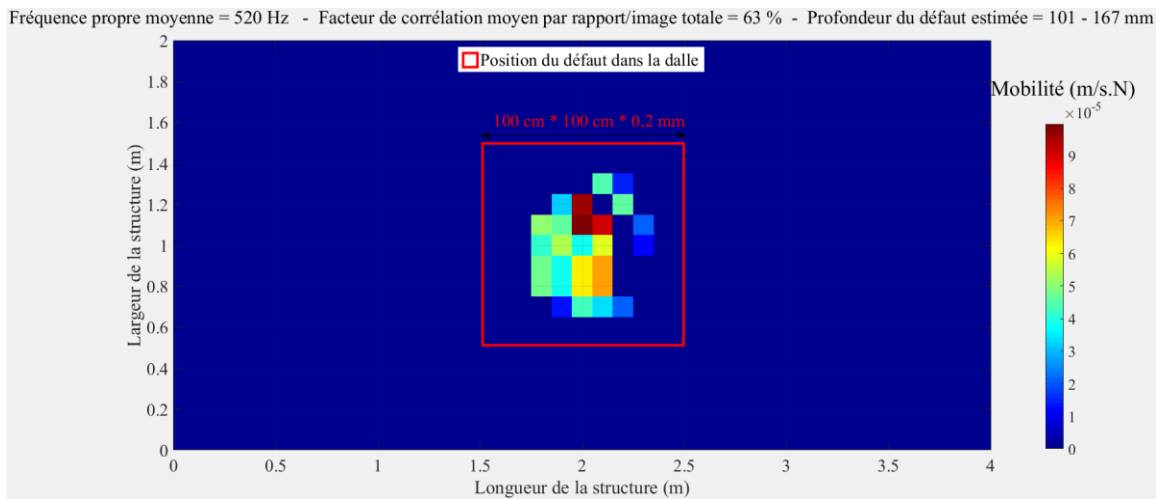


Figure 8.30 : Analyse 1 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour l’estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration moyenne de 520 Hz.

- **Résultats d'analyse 2 : Cartographie pour la détection**

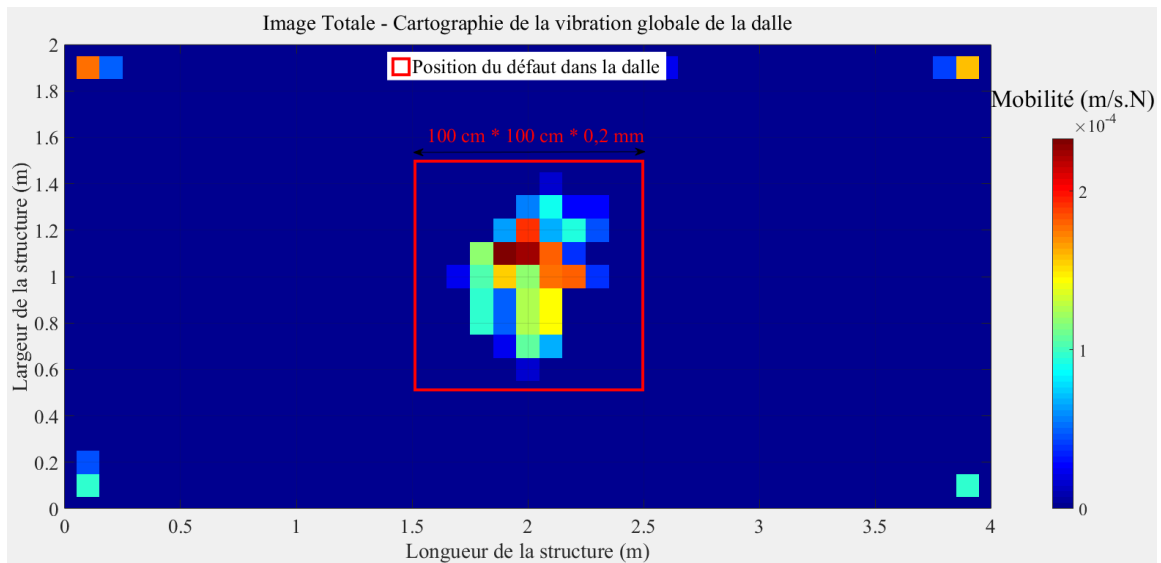


Figure 8.31 : Analyse 2 – Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection – Cartographie de la vibration globale de la dalle.

- **Résultats d'analyse 2 : Cartographies pour l'estimation du diamètre et de la profondeur du défaut**

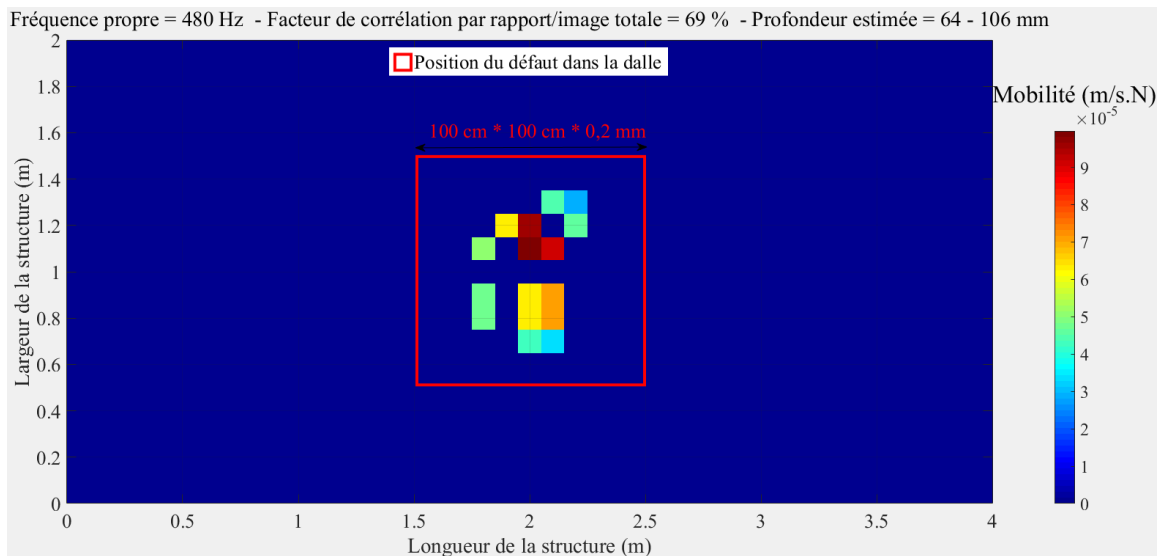


Figure 8.32 : Analyse 1 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour l'estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 480 Hz (mode 1).

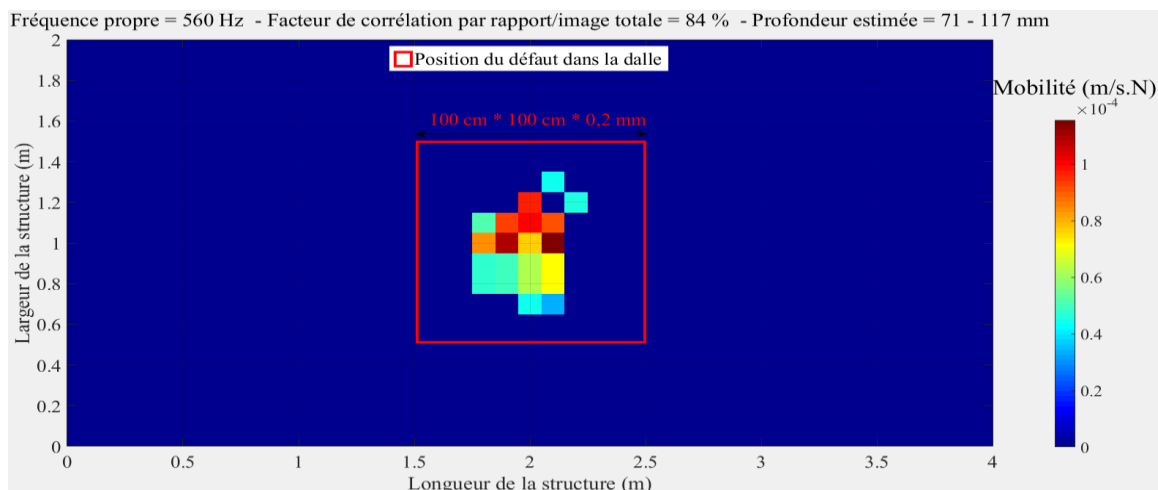


Figure 8.33 : Analyse 1 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour l’estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 560 Hz.

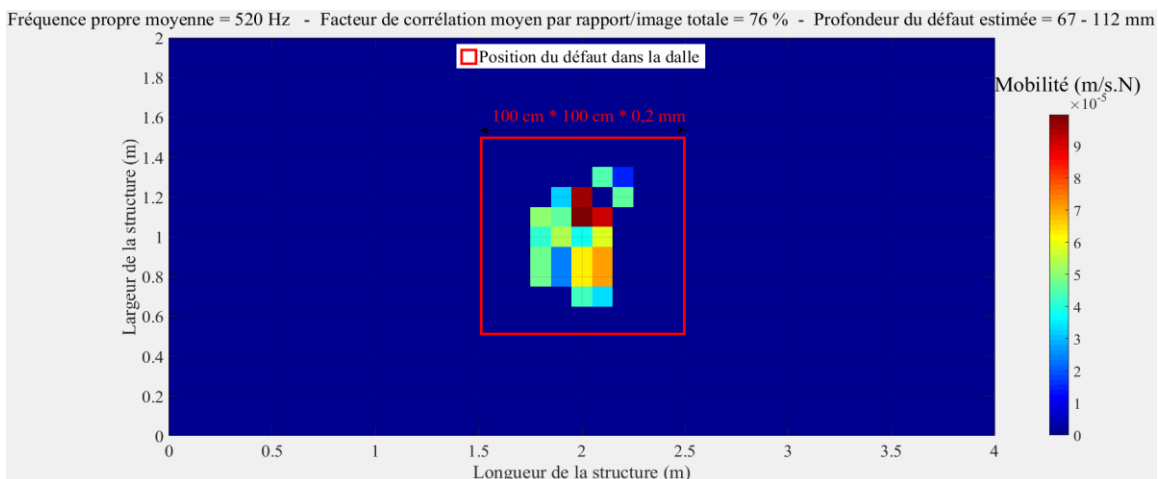


Figure 8.34 : Analyse 1 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour l’estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration moyenne de 520 Hz.

### ➤ Résultats : Approche conventionnelle - RI

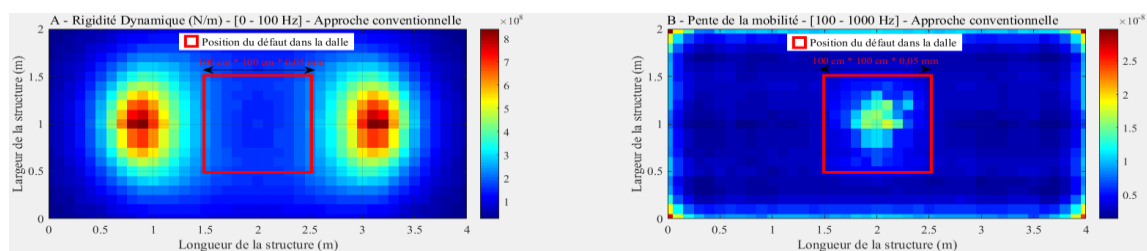


Figure 8.35 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Rigidité dynamique –B : Pente de la mobilité.

➤ **Résultats : Approche arithmétique – RI**

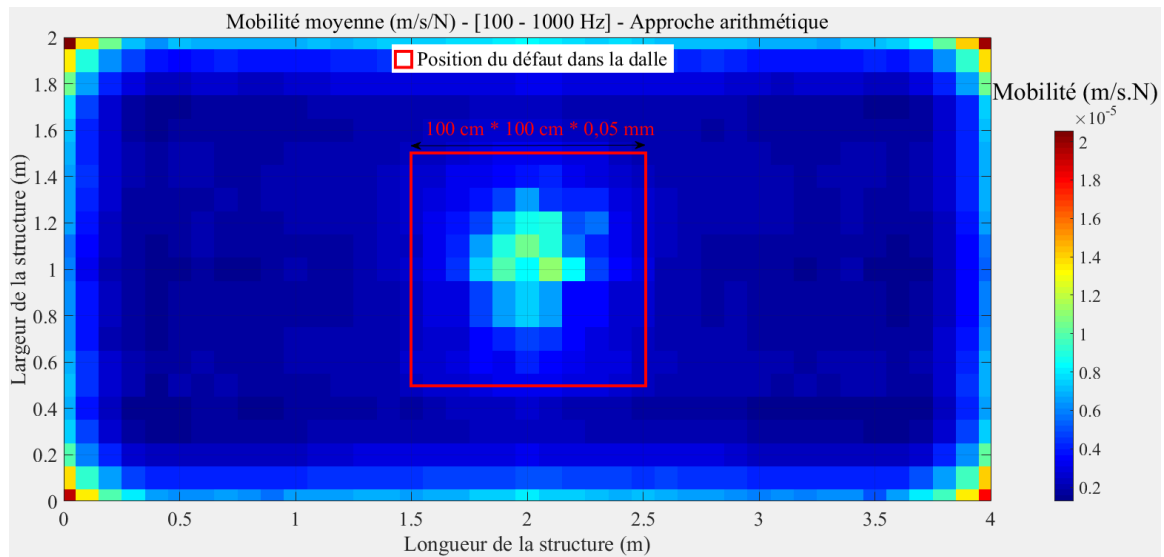


Figure 8.36 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes.

**8.3.3.2 Étude pour le défaut de 1800 mm \* 1800 mm \* 0,2 mm placé à une profondeur du défaut = 150 mm**

➤ **Résultats : Analyse modale**

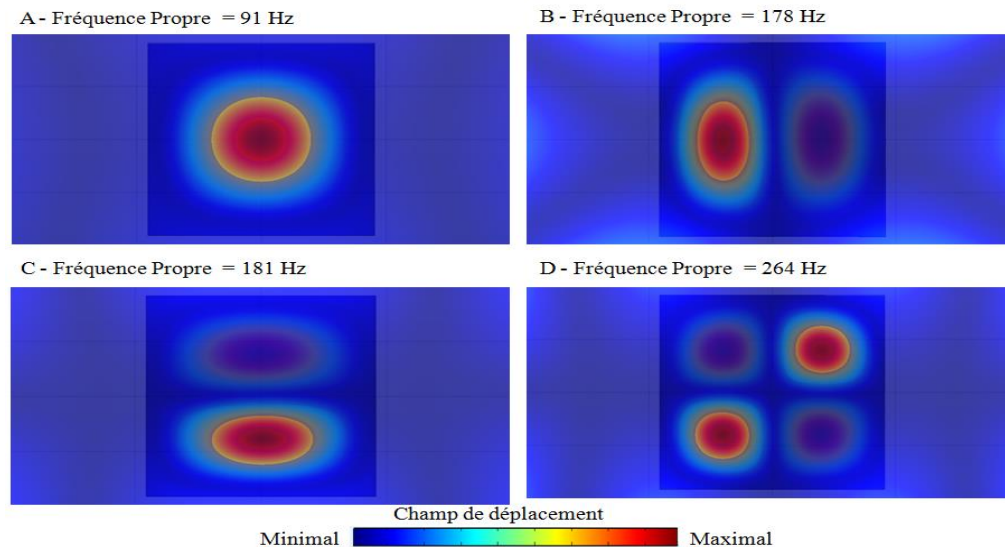


Figure 8.37 : Analyse modale – Cartographie des modes propres.

➤ **Résultats : Approche développée et analyse des paramètres**

• **Résultats d'analyse 1 : Cartographies pour la détection**

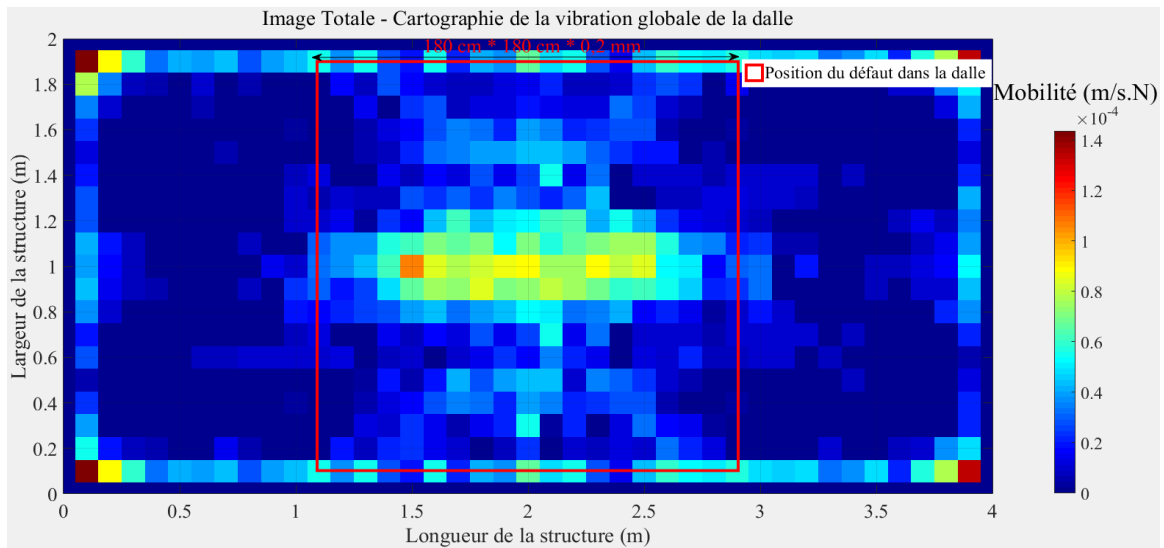


Figure 8.38 : Analyse 1 – Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection – Cartographie de la vibration globale de la dalle.

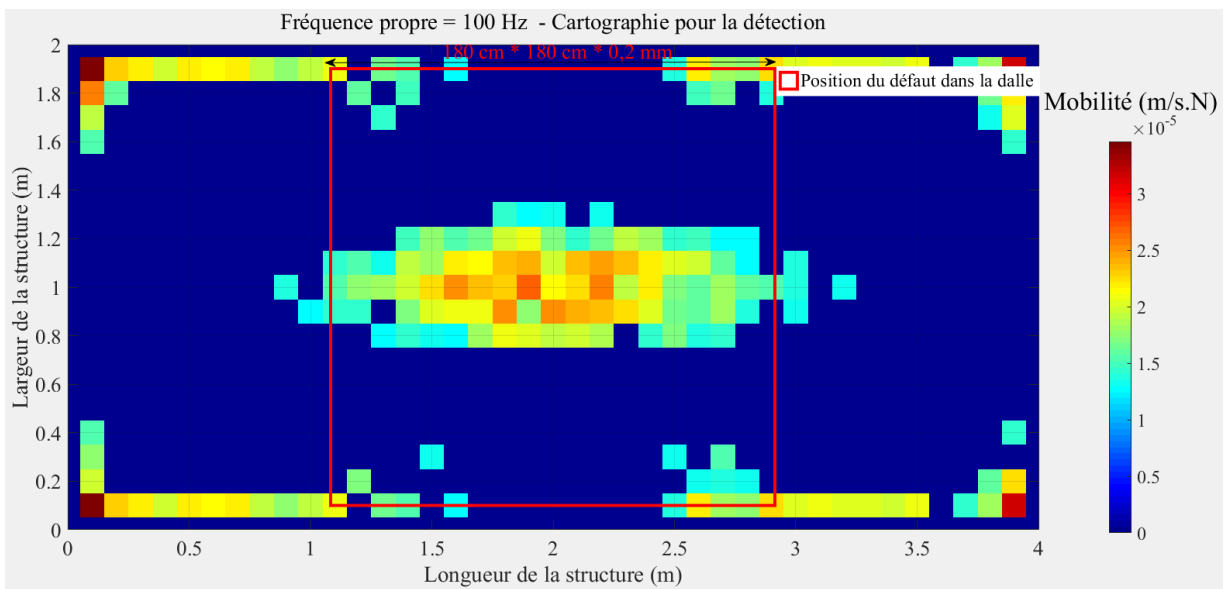


Figure 8.39 : Analyse 1 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 100 Hz.

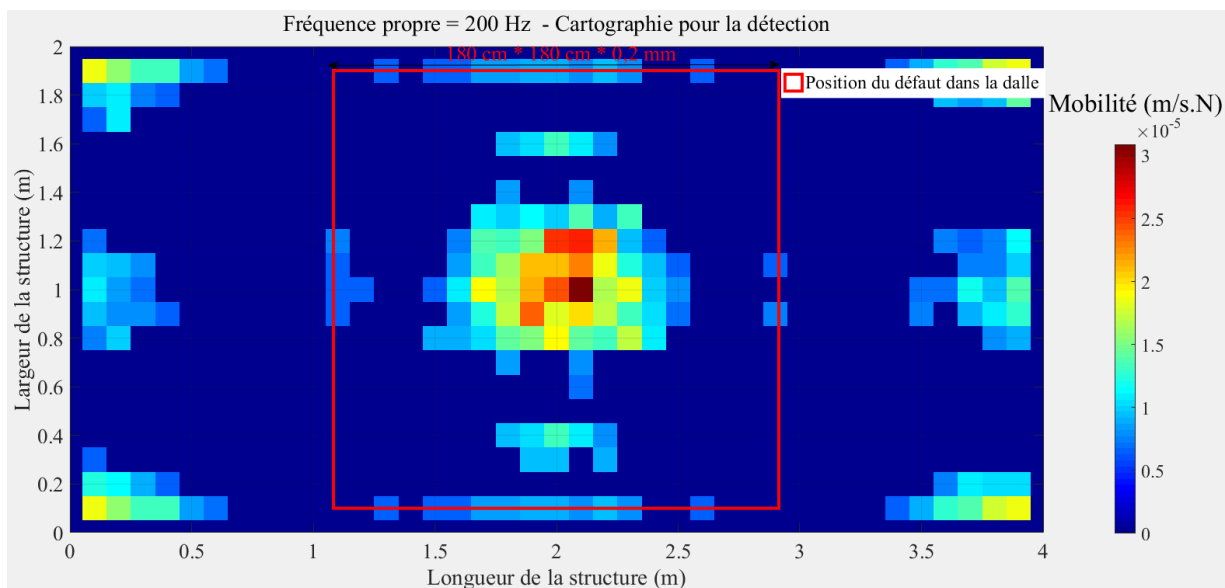


Figure 8.40 : Analyse 1 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 200 Hz.

### ➤ Résultats d'analyse 2 : Cartographies pour la détection

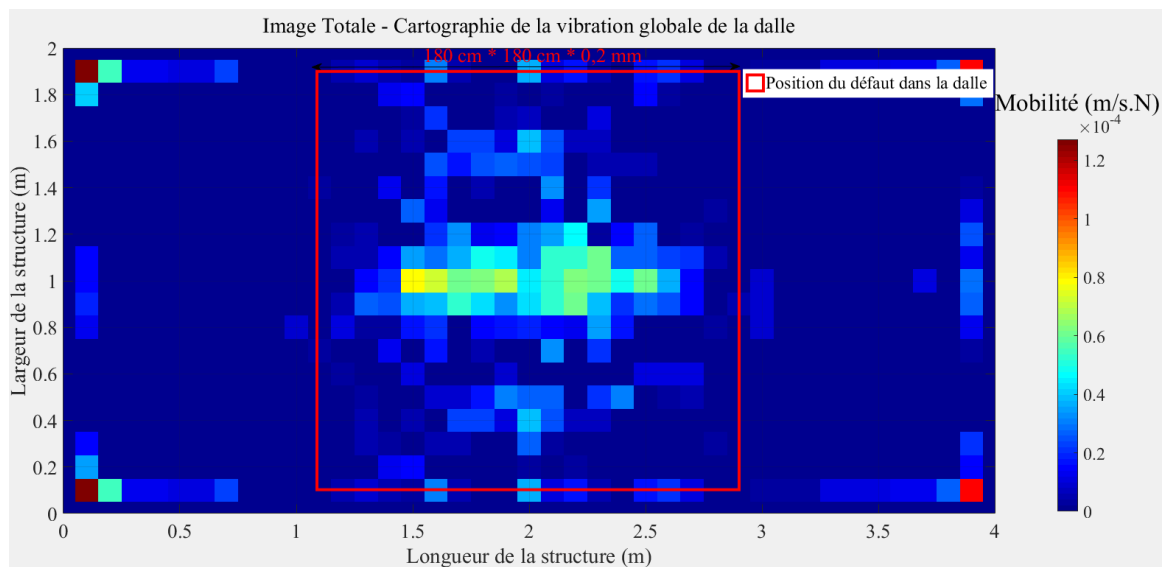


Figure 8.41 : Analyse 2 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection

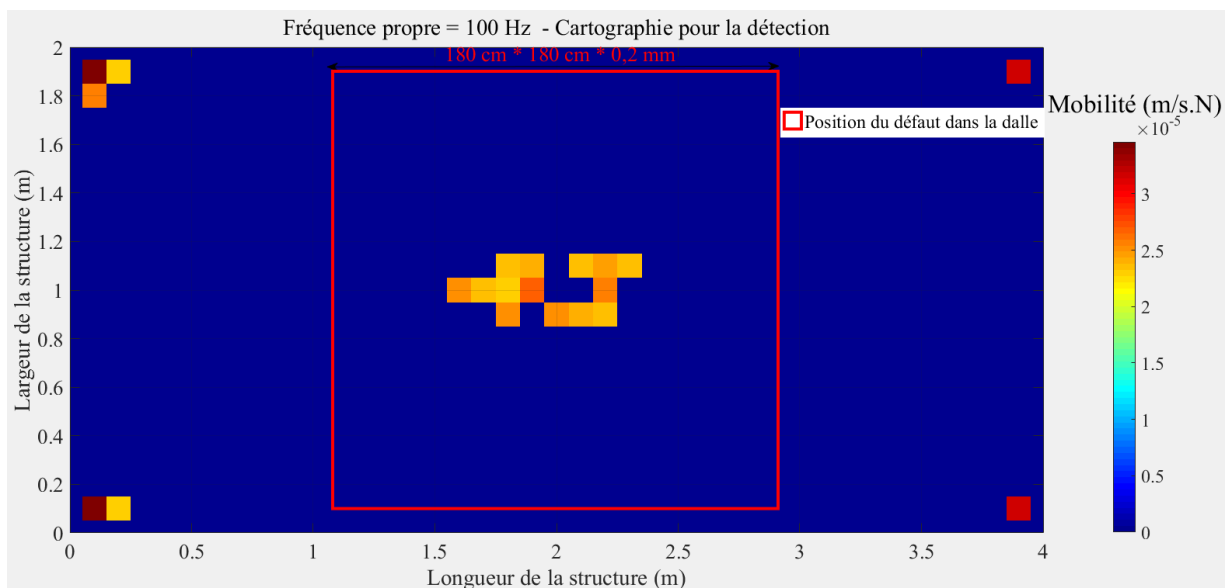


Figure 8.42 : Analyse 2 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 150 Hz.

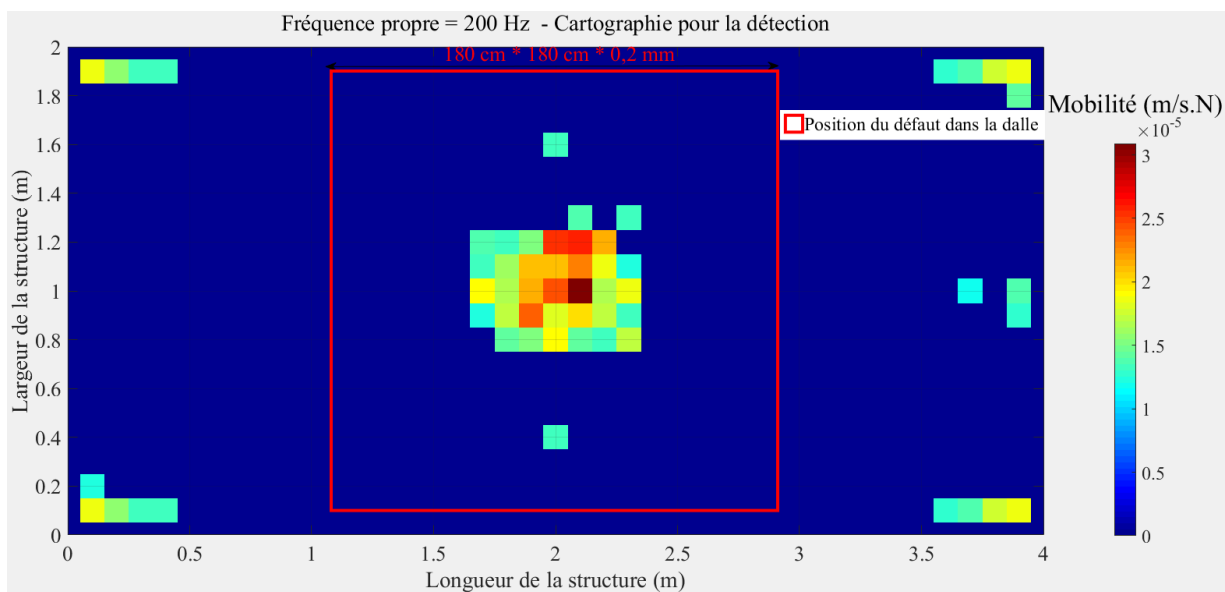


Figure 8.43 : Analyse 2 – Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 150 Hz



### ➤ Résultats : Approche conventionnelle - RI

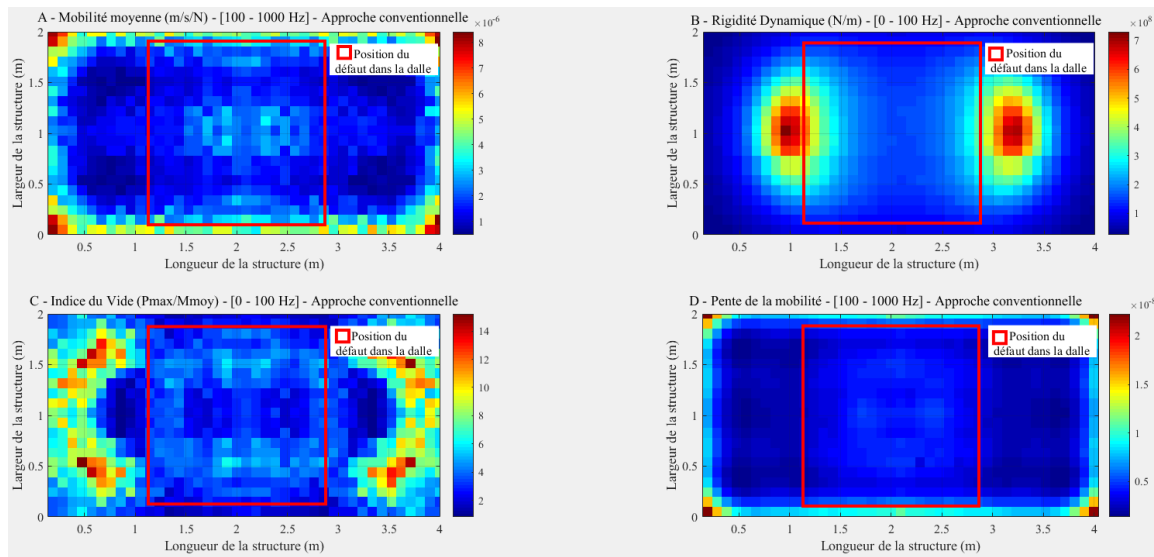


Figure 8.44 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes – B : Rigidité dynamique – C : Indice du vide – D : Pente de la mobilité.

### ➤ Résultats : Approche « arithmétique » – RI

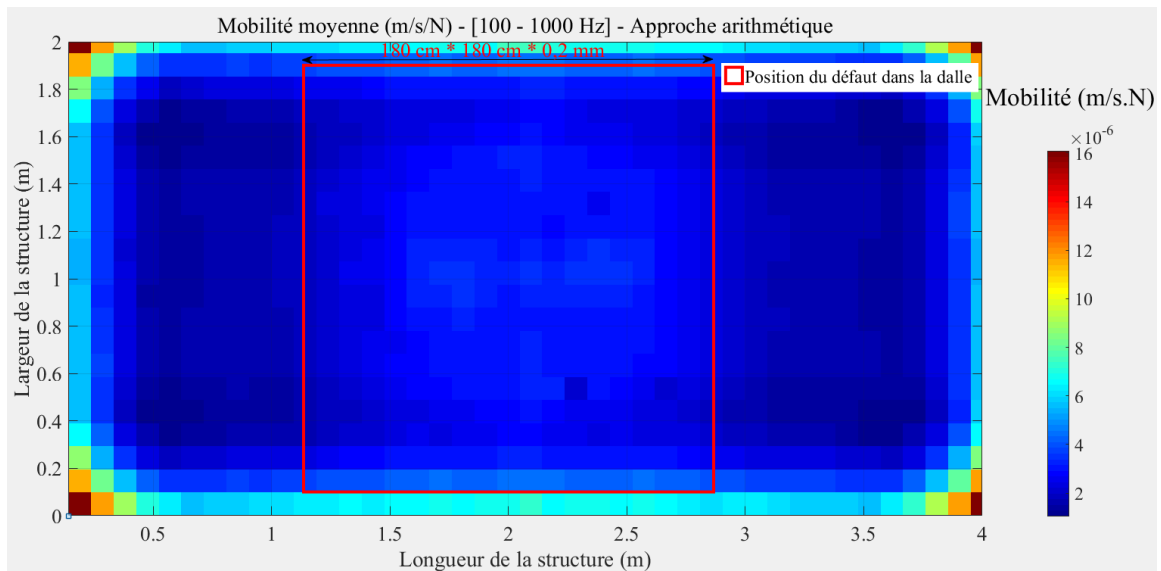


Figure 8.45 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes.

## 8.4 Analyse des résultats de l'étude paramétrique

L'analyse des résultats de l'étude paramétrique se feront d'après les résultats de :

- L'analyse modale ;
- L'approche développée ;
- L'approche conventionnelle ;
- L'approche dite « arithmétique ».

### 8.4.1 Analyse modale

L'étude modale apporte des informations intéressantes par rapport aux modes de vibrations. L'étude a permis dans le cas des dalles avec un défaut de distinguer les modes de vibration associés à la vibration globale et les modes associés à la vibration locale du défaut. Les modes locaux peuvent être de plusieurs ordres. Grâce à l'étude modale, on parvient à distinguer ces différents modes et principalement le mode de vibration de premier ordre qui nous intéresse pour la validation de l'hypothèse formulée dans la mise en place de l'approche développée. En fonction de chaque paramètre étudié, on note :

#### ➤ Étude pour différentes largeurs du défaut

Les résultats de l'étude modale montrent que le défaut de dimensions 800 mm \* 800 mm \* 0,2 mm vibre selon différents modes (**Figure 8.7 A, C, D**) et son premier mode de vibration correspond à une fréquence propre de **428 Hz (Figure 8.7 A)**. La **Figure 8.7 B** représente une vibration de la dalle en mode globale à la fréquence de 521 Hz.

Les résultats de l'étude modale montrent que le défaut de 1800 mm \* 1800 mm vibre à différents modes (**Figure 8.17 A, B, C, D**) et la fréquence propre associée au premier mode de vibration est égale à 91 Hz (**Figure 8.17 A**).

Pour les défauts de diamètre de 1000 mm \* 1000 mm et 1500 mm \* 1500 mm placés à la même position dans la dalle, les résultats de l'analyse modale montrent que ces défauts vibrent respectivement à des fréquences propres (premier mode de vibration) de **263 Hz**

(Figure 7.2 C) et de **126 Hz** (Figure 7.3 C). La fréquence propre de vibration du défaut (premier mode) diminue donc avec l'augmentation de la largeur ou du diamètre du défaut.

#### ➤ Étude pour différentes profondeurs du défaut

Les résultats de l'analyse modale montrent que le défaut de dimensions 1000 mm \* 1000 mm \* 200 mm placé à 100 mm de profondeur vibre à une fréquence propre de premier mode de vibration à **476 Hz** (Figure 8.26 A). Ce défaut vibre également à une fréquence propre de **914 Hz** (Figure 8.26 D). D'autres modes de vibration dont les modes globaux ont été également observés (Figures 8.26 B, C). Le même défaut placé à 50 mm de profondeur, les résultats de l'analyse modale montrent que celui-ci vibre à une fréquence propre de premier mode de vibration à **263 Hz** (Figure 7.2 C) ;

Les résultats de l'analyse modale montrent que le défaut de dimensions 1800 mm \* 1800 mm \* 200 mm placé à 150 mm de profondeur vibre à une fréquence propre de premier mode de vibration à **91 Hz** (Figure 8.37 A). D'autres modes de vibration sont également observés (Figures 8.37 B, C, D). Le même défaut placé à 50 mm de profondeur, les résultats de l'analyse modale montrent que celui-ci, du fait de la symétrie de la plaque, vibre à une fréquence propre de premier mode de vibration à **91 Hz** (Figure 8.17 A).

En prenant en compte la symétrie de la plaque, la fréquence propre de vibration du défaut (premier mode) augmente donc avec la profondeur. En nous basant sur de l'étude modale, connaissant la fréquence de vibration locale du défaut, nous serions en mesure de valider l'approche développée.

#### ➤ Étude par rapport à la nature de la source d'excitation

Les résultats de l'analyse modale montrent que l'utilisation d'une fréquence d'excitation de 2000 Hz permet d'exciter pour un défaut de dimensions de 40 cm \* 40 cm \* 0,2 mm, les modes propres associés à sa vibration. On voit que le défaut vibre à une fréquence propre de premier ordre de **1451 Hz** (Annexe A.1, Figure A.6 C).

La détection des défauts de tels diamètres (diamètres inférieurs à 40 cm \* 40 cm) nécessite donc des sources ayant des fréquences d'excitation supérieures à 1000 Hz car leurs fréquences

propres de vibration se situent au-delà de la gamme de fréquences comprise entre 0 et 1000 Hz. Il faut alors des sources de hautes fréquences (entre 0 et 3000 Hz ou entre 0 et 4000 Hz) capables d'exciter les défauts de petite taille.

➤ **Étude pour une dalle à multi-défauts et par rapport à la position du défaut**

Les résultats de l'analyse modale montrent qu'une dalle constituée de plusieurs défauts de diamètres différents vibre selon les modes globaux mais également selon les modes locaux associés à la vibration de chaque défaut (**Annexe A.1, Figure A.17**). Les défauts de dimensions de 600 mm \* 600 mm \* 0,2 mm, 1000 mm \* 1000 mm \* 0,2 mm et 800 mm \* 800 mm \* 0,2 mm vibrent respectivement à des fréquences de premier ordre de 706 Hz (**Annexe A.1, Figure A.17 H**), 260 Hz (**Annexe A.1, Figure A.17 B**) et 432 Hz (**Annexe A.1, Figure A.17 E**).

On note que les défauts de dimensions de 1000 mm \* 1000 mm \* 0,2 mm et 800 mm \* 800 mm \* 0,2 mm dans la dalle à multi-défauts vibrent quasiment aux mêmes fréquences (premier ordre) que lorsqu'ils sont chacun seul dans une dalle :

- Dans la dalle à multi-défauts le défaut de dimensions de 1000 mm \* 1000 mm \* 0,2 mm vibre à une fréquence propre (premier ordre) de 260 Hz (**Annexe A.1, Figure A.17 B**), par contre seul dans la dalle celui-ci vibre à une fréquence propre (premier ordre) de 263 Hz (**Figure 7.2 C**).
- Dans la dalle à multi-défauts le défaut de dimensions de 800 mm \* 800 mm \* 0,2 mm vibre à une fréquence propre (premier ordre) de 432 Hz (**Annexe A.1, Figure A.17 E**), par contre seul dans la dalle celui-ci vibre à une fréquence propre (premier ordre) de 428 Hz (**Figure 8.7 A**).

La position du défaut n'affecte pas les modes et les fréquences propres associés (premier ordre) à la vibration du défaut. Le défaut de 800 mm \* 800 mm \* 0,2 mm placé à l'extérieur du centre de la dalle (**Annexe A.1, Figure A.17 E**) vibre à une fréquence propre de 432 Hz (premier ordre) alors que seul dans la dalle et placé au centre de la dalle (**Figure 8.7 A**) celui-ci vibre à une fréquence propre de 428 Hz (premier ordre). Les défauts vibrent donc à la même fréquence, quels que soient l'état de dégradation des dalles et leur position dans les structures.

### 8.4.2 Analyse selon l'approche développée

L'approche développée permet la lecture des données brutes, le traitement et la correction des données, la visualisation des données sous forme cartographique et la caractérisation des paramètres de conception d'un système d'évaluation de la perte d'adhérence. Le principe de l'approche a été expliqué au **chapitre 6**.

Les cartographies des dalles avec des défauts, issues de l'étude paramétrique se distinguent clairement des cartographies de la dalle sans défaut. La suppression des modes globaux ou modes communs fournit, soient des cartographies de vibration locale dans le cas d'une dalle avec défaut où seul le défaut vibre, soient des cartographies de vibration globale dans le cas d'une dalle avec défaut où le défaut et les autres éléments de la dalle vibrent, soient des cartographies de vibration globale dans le cas d'une dalle saine caractérisée par des modes dus généralement aux effets de bords (**Figures 8.3 et 8.4**).

Dans le cas de l'étude des dalles avec défauts, l'approche développée permet de fournir deux types de cartographies, les cartographies de détection et les cartographies d'estimation des caractéristiques du défaut (diamètre et profondeur) :

#### ➤ **Cartographies pour la détection du défaut**

L'étude paramétrique a permis de montrer que la détection du défaut à partir de l'approche développée varie fortement en fonction de certains paramètres étudiés à savoir :

- **Le diamètre des défauts** : L'approche développée parvient à détecter les défauts, dont les dimensions sont d'au moins de 20 cm \* 20 cm. Exemples : le défaut de 40 cm \* 40 cm \* 0,2 mm (**Annexe A.1, Figures A.7, 8, 9, et 10**) ; le défaut de dimensions 80 cm \* 80 cm \* 0,2 mm (**Figures 8.8, 9, 10, 11**) ; le défaut de dimensions 180 cm \* 180 cm \* 0,2 mm (**Figures 8.18, 19, 20**). Plus la largeur du défaut est élevée, plus la probabilité de détection est grande.
- **La profondeur du défaut** : L'approche parvient à détecter les défauts situés jusqu'à 15 cm de profondeur sous la dalle. Exemples : le défaut de dimensions 100 cm \* 100 cm \* 0,2 mm placé à 10 cm de profondeur (**Figures 8.27, 31**) ; le défaut

de dimensions 180 cm \* 180 cm \* 0,2 mm placé à 15 cm de profondeur (**Figures 8.38, 39, 40, 41, 42, 43**).

Cependant, la détection du défaut devient moins évidente plus la profondeur du défaut augmente et plus sa largeur diminue.

- **La fréquence d'excitation de la source** : L'approche développée parvient à détecter les défauts de dimensions inférieures ou égales à 40 cm \* 40 cm lorsque la fréquence d'excitation de la source utilisée est supérieure à 1000 Hz. Les fréquences propres de vibration de ces défauts se situent au-delà de 1000 Hz (**Figure 8.7**). Et donc pour détecter ce type de défauts, il faut absolument utiliser des sources, dont les fréquences de vibration sont d'au moins de 2000 Hz ou 3000 Hz. Par exemple le défaut de dimensions de 40 cm \* 40 cm \* 0,2 mm (**Annexe A.1, Figures A.7, 8**) excité à une fréquence de 2000 Hz est très bien détectable. Par contre, l'utilisation des sources dont la fréquence d'excitation est égale à 1000 Hz ne permet pas sa détection (**Annexe A.1, Figures A.1, 2, et 3**). En revanche, les défauts de diamètre supérieur à 40 cm \* 40 cm sont facilement détectables avec des sources dont la fréquence d'excitation est égale à 1000 Hz. Pour ces défauts, leur premier mode de vibration se situe entre 0 et 1000 Hz.
- **Position du défaut** : L'approche développée parvient à détecter les défauts, quelle que soit leur position dans la dalle. Par exemple le défaut de dimensions de 180 cm \* 180 cm \* 0,2 mm excentré c'est-à-dire non situé au centre de la dalle est bien détecté (**Annexe A.1, Figure A.13**). Le même défaut situé au centre de la dalle est aussi bien détecté (**Figures 8.18, 20**). La différence entre les deux positions du défaut se situe en termes de mobilité. La mobilité maximale ( $1.2 \cdot 10^{-3}$  m/s.N) du défaut situé au centre de la dalle est plus faible que celle du défaut situé à l'excentricité de la dalle ( $2 \cdot 10^{-3}$  m/s.N).
- **Dalle à multi-défauts** : L'approche développée parvient à détecter les défauts dans une dalle à multi-défauts.

Dans la dalle à multi-défauts étudiée, les trois défauts de dimensions respectives de 60 cm \* 60 cm \* 0,2 mm, 100 cm \* 100 cm \* 0,2 mm et 80 cm \* 80 cm \* 0,2 mm sont bien détectés (**Annexe A.1, Figures A.18, 22**). Les défauts de dimensions 100 cm \* 100 cm \* 0,2 mm et 80 cm \* 80 cm \* 0,2 mm sont bien détectés aux fréquences de vibration respectives de 210 et 280 Hz (**Annexe A.1, Figures A.19, 20**). Le défaut de dimensions 80 cm \* 80 cm \* 0,2 mm est bien détecté à la fréquence de vibration de 420 Hz (**Annexe A.1, Figures A.21**).

➤ **Cartographies pour l'estimation des caractéristiques du défaut (diamètre et profondeur du défaut)**

L'estimation du diamètre ou de la surface du défaut est faite à partir des cartographies de la vibration locale c'est-à-dire à partir des cartographies où seul le défaut vibre en considérant son mode de vibration de premier ordre selon l'hypothèse formulée. La surface du défaut est déduite grâce à un algorithme développé dans le programme informatique qui permet de compter le nombre de pixels correspondants à la zone du défaut et par la suite de multiplier ce nombre de pixels par la surface d'un pixel. Une fois la surface du défaut évaluée, connaissant les autres paramètres de la dalle décrits au chapitre 6 et surtout la fréquence propre du défaut de premier ordre fournie par la cartographie de vibration locale, la profondeur du défaut est ainsi estimée en utilisant l'équation 6.4.

Pour évaluer la profondeur des défauts, nous avons utilisé deux approches (décrites au paragraphe 4 du chapitre 7). Les deux approches utilisées sont intéressantes, car les résultats obtenus sont similaires.

En effet, dans l'étude paramétrique pour le cas par exemple des différentes largeurs du défaut, pour le défaut de dimensions 80 cm \* 80 cm \* 0,2 mm placé à 50 mm de profondeur dans la dalle, on obtient en utilisant l'approche numéro 1 une estimation de la profondeur comprise entre **55 mm** et **91 mm** (**Figure 8.12**) et en utilisant l'approche numéro 2, on obtient une estimation de la profondeur comprise entre **58 mm** et **95 mm** (**Figure 8.14**).

L'estimation de la profondeur du défaut varie en fonction de certains paramètres étudiés à savoir :

- **Le diamètre des défauts** : L'approche développée parvient uniquement à estimer la profondeur des défauts, dont les dimensions, sont d'au moins de 20 cm \* 20 cm, car ces défauts sont caractérisés par des modes de vibrations locaux.

Ainsi, pour le défaut de 180 cm \* 180 cm placé à 5 cm de profondeur sous la dalle a une fréquence propre de premier mode de 90 Hz, sa profondeur estimée après analyse (approche numéro 1) se situe entre **35 mm** et **109 mm** (Figure 8.21). D'après l'approche numéro 2, la profondeur est estimée entre **54 mm** et **131 mm** (Figure 8.23).

Le défaut de 40 cm \* 40 cm placé à 5 cm de profondeur sous la dalle a une fréquence propre de premier mode de 1470 Hz. Sa profondeur estimée après analyse se situe entre **51 mm** et **77 mm** (Annexe A.1, Figures A.8).

Pour les défauts dont le diamètre est inférieur à 20 cm \* 20 cm, leurs modes de vibration locaux ont tendance à être confondus avec les autres modes de vibration de la dalle pour former des modes globaux. Dans ce cas, on ne peut pas estimer leur profondeur.

- **La profondeur du défaut** : L'approche ne parvient pas à estimer la profondeur des défauts situés à plus de 15 cm de profondeur sous la dalle. À de telles profondeurs, le défaut a tendance à vibrer en mode global avec l'ensemble de la dalle. Pour le cas du défaut de dimensions 180 cm \* 180 cm \* 0,2 mm placé à 15 cm sous la dalle, les analyses 1 et 2 ne permettent pas d'estimer la profondeur du défaut (Figures 8.39, 40, 42, 43).

Par contre, on voit que le défaut de dimensions 100 cm \* 100 cm placé 10 cm de profondeur sous la dalle, l'approche permet d'estimer sa profondeur selon l'approche numéro 1 entre **64 mm** et **106 mm** (Figure 8.32) et entre **67 mm** et **112 mm** (Figure 8.34) selon l'approche numéro 2.



Plus la profondeur du défaut augmente et plus il est difficile d'évaluer sa profondeur avec l'approche développée, car les modes associés à la vibration de ce défaut sont des modes globaux.

- **La fréquence d'excitation de la source** : L'approche parvient à estimer la profondeur des défauts dont le diamètre est compris entre 20 cm \* 20 cm et 50 cm \* 50 cm lorsque la fréquence d'excitation maximale de la source utilisée est d'au moins de 1000 Hz. Pour pouvoir caractériser ce type de défauts, il faut absolument utiliser des sources, dont les fréquences d'excitation maximales, sont d'au moins de 1000 Hz, car leurs fréquences propres de vibration se situent entre 1000 et 2000 Hz (**Figure 7.7**).

Par exemple, la profondeur du défaut de dimensions de 40 cm \* 40 cm placé à 5 cm sous la dalle, excité avec une source de fréquence de vibration de 2000 Hz, est très bien estimée entre **51 mm** et **77 mm** à la fréquence de vibration de 1470 Hz (**Annexe A.1, Figures A.8**).

L'utilisation des sources dont les fréquences d'excitation sont inférieures ou égales à 1000 Hz ne permet pas ainsi l'estimation de la profondeur des défauts dont le diamètre est compris entre 20 cm \* 20 cm et 50 cm \* 50 cm. Par exemple le défaut de dimensions de 40 cm \* 40 cm \* 0,2 mm placé à 5 cm, excité avec une fréquence maximale de 1000 Hz, l'approche ne parvient pas à estimer sa profondeur, car à cette fréquence maximale seuls les modes globaux sont uniquement représentés (**Annexe A.1, Figures A.2, et 3**). Le choix de la fréquence d'excitation de la source est donc important dans l'évaluation de la profondeur du défaut à partir de l'approche développée.

- **Position du défaut** : L'approche développée parvient à estimer la profondeur des défauts, quelle que soit leur position dans la dalle. Par exemple, la profondeur du défaut de dimensions de 180 cm \* 180 cm \* 0,2 mm placé à 5 cm dans la dalle, excentré c'est-à-dire non situé au centre de la dalle, vibrant à la fréquence propre de **90 Hz** est estimée entre **50 mm** et **94 mm** (**Annexe A.1, Figure A.14**). Le même défaut situé au centre de la dalle vibrant à la fréquence de 90 Hz, sa profondeur est estimée entre **54 mm** et

**131 mm (Figures 8.23).** La position du défaut n'affecte pas considérablement l'estimation de la profondeur du défaut en utilisant l'approche développée.

- **Dalle à multi-défauts :** Dans l'étude effectuée, l'approche développée ne parvient pas à estimer la profondeur de chaque défaut dans une dalle à multi-défauts. La dalle a tendance à vibrer en modes globaux avec l'ensemble des défauts. Les trois défauts de dimensions respectives de 60 cm \* 60 cm \* 0,2 mm, 100 cm \* 100 cm \* 0,2 mm et 80 cm \* 80 cm \* 0,2 mm vibrent tous ou deux à la fois en modes globaux aux fréquences propres de 210 Hz, 280 Hz, 420 Hz et 700 Hz (**Annexe A.1, Figures A.19, 20, 21, 22**). Dans ce cas, il est impossible d'estimer la profondeur de chacun des défauts.

Dans une dalle à multi-défauts, l'estimation de la profondeur de chaque défaut par l'approche développée n'est pas évidente, car l'ensemble de la dalle vibre en modes globaux. Plus la dalle est dégradée et plus les modes respectifs locaux de défauts s'interfèrent pour former des modes globaux.

#### ➤ **Analyse des paramètres de traitement**

Les cartographies obtenues à partir de l'approche développée donnent des informations importantes sur les caractéristiques des défauts. La précision et la pertinence de ces cartographies dépendent du choix des paramètres de traitement.

Pour rappel, les étapes d'exécution du programme d'analyse sont résumées à la **Figure 6.2**. Les principales étapes sont :

- **Étape 1 : La lecture des données ;**
- **Étape 2 : La détection des pics de mobilité** (définition d'un seuil de détection des pics) ;
- **Étape 3 : Le regroupement des fréquences propres** (définition d'un paramètre de résolution) ;
- **Étape 4 : La réalisation des cartographies des modes de vibration** (cartographies de vibration globale et les cartographies de vibration locale) à partir des fréquences propres (définition du paramètre d'émergence) ;

- **Étape 5 : Estimation des paramètres du défaut.** Estimation du diamètre ou de la surface des défauts à partir de cartographies de vibration locale du défaut (définition du paramètre de seuil d'affiche d'image) et estimation de la profondeur des défauts connaissant la fréquence de vibration du défaut, la surface du défaut et les autres paramètres définis et décrits au chapitre 6.

Pour montrer comment le choix des paramètres d'analyse peut affecter la détection et la caractérisation des défauts dans une dalle de béton, nous avons réalisé deux types d'analyses (analyse 1 et analyse 2). Dans les deux cas d'analyses, nous avons à chaque fois fixé deux paramètres (**Tableaux 8.4, 5, 6, 7, 8**) :

- **Le paramètre de seuil de détection des pics de mobilité :** C'est le paramètre de détection des pics de mobilité et notamment les pics associés à la vibration du défaut dans le cas d'une dalle avec défaut. Dans notre étude, ce paramètre est à priori fixé à une valeur correspondant à epsilon. Une valeur correspondant à epsilon permet de détecter et de prendre en considération tous les pics de mobilité sur une courbe de mobilité spectrale y compris donc les pics de très faible amplitude.
- **Le paramètre de seuil de mobilité d'affichage d'image :** Ce paramètre permet l'évaluation du diamètre ou de la surface du défaut. En effet dans une dalle avec un défaut, ce paramètre permet de distinguer les mobilités qui sont associées à sa vibration et celles associées à la vibration des autres composantes de la dalle. Ce paramètre à priori doit être fixé à une valeur correspondant à zéro. Le seuil de mobilité défini à zéro est un seuil minimal de la mobilité c'est-à-dire un seuil mobilité nulle correspondant à la partie de la dalle dont le déplacement est nul (partie saine de la dalle). Ainsi, toutes les valeurs de mobilité situées au-dessus de ce seuil, c'est-à-dire différentes de zéro, correspondraient aux mobilités associées à la vibration du défaut. La surface du défaut est ensuite déduite directement sur les cartographies en comptant le nombre de pixels correspondant à la mobilité du défaut puis en multipliant ce nombre par la surface d'un pixel.

Les autres paramètres d'analyse varient :

- **Le paramètre de résolution** : Ce paramètre consiste à rééchantillonner le signal sur l'axe des fréquences, à identifier, regrouper les pics de fréquences proches point de mesure par point de mesure sur l'ensemble de la zone d'étude puis à trier les fréquences associées à la vibration du défaut des fréquences associées à la vibration globale de la dalle. Dans notre étude, ce paramètre varie d'un paramètre de conception à l'autre :
- **Étude pour différentes largeurs du défaut** : Le paramètre de résolution est égal à **60 Hz** pour le défaut de dimensions de 80 cm \* 80 cm \* 0,2 mm, **90 Hz** pour le défaut de dimensions 180 cm \* 180 cm \* 0,2 mm, **70 Hz** pour le défaut de dimensions 100 cm \* 100 cm \* 0,2 mm ;
- **Étude pour différentes profondeurs du défaut** : Le paramètre de résolution est égal à **80 Hz** pour le défaut de dimensions de 80 cm \* 80 cm \* 0,2 mm situé à 10 cm de profondeur, **100 Hz** pour le défaut de dimensions 180 cm \* 180 cm \* 0,2 mm situé à 15 cm de profondeur.

Ce paramètre est ajusté en se basant à priori sur l'émergence de la fréquence vibration (premier mode) du défaut qui permet d'élaborer la cartographie de la vibration locale. À partir de l'analyse modale, on peut connaître la fréquence propre (premier mode) de vibration du défaut. Pour des défauts de diamètre supérieur ou égal à 20 cm \* 20 cm, cette fréquence propre peut être directement obtenue sur la courbe de mobilité spectrale.

Par exemple, dans l'étude pour différentes largeurs du défaut, les fréquences propres (premier mode) de vibration des défauts de dimensions de 80 cm \* 80 cm \* 0,2 mm, 100 cm \* 100 cm \* 0,2 mm et 150 cm \* 150 cm \* 0,2 mm fournies par les courbes de mobilités spectrales sont respectivement de **430 Hz**, **263 Hz** et **130 Hz**. En comparant l'étude modale et l'étude de la réponse impulsionnelle, on voit que les deux études conduisent quasiment aux mêmes résultats en termes d'identification des fréquences propres des défauts (**Figures 7.4, 5, 6**).

- **Le paramètre d'émergence** : Ce paramètre permet l'émergence des modes de vibration (cartographies de vibration globale et les cartographies de vibrations locales) en fonction des fréquences propres de vibration. Dans une dalle avec défaut, la détection du défaut

est d'autant plus élevée lorsque la valeur du paramètre d'émergence définie est faible ou tend vers zéro. En effet, plus le paramètre d'émergence est faible, plus les modes de vibration apparaissent, y compris certains modes de vibration associés au défaut souvent de faibles amplitudes correspondant aux zones de vibration minimale du défaut (bords ou coins du défaut). Donc le fait d'avoir un paramètre d'émergence assez faible augmente la résolution de la cartographie de détection.

On voit par exemple dans le cas de la dalle avec défaut, étude pour différentes largeurs du défaut, le défaut de dimensions 80 cm \* 80 cm \* 0,2 mm dans la cartographie de vibration globale (**Figure 8.8**) obtenue avec un paramètre d'émergence égal à un (Analyse 1) est mieux représenté, mieux détecté que dans la cartographie de vibration globale (**Figure 8.11**) où le facteur d'émergence est égal à quatre (Analyse 2).

Par contre les cartographies locales associées à la vibration du défaut sont plus précises avec un facteur d'émergence égal à quatre. Ainsi, on peut estimer les caractéristiques du défaut (**Figures 8.12, 13, 14**).

Avec un paramètre d'émergence égal à un (1), les modes associés à la vibration du défaut interfèrent avec les autres modes de la dalle (**Figures 8.9, 10**). Dans ces conditions, on ne peut pas estimer les caractéristiques du défaut.

Le paramètre d'émergence a plus d'impact dans l'élaboration des cartographies et notamment les cartographies de vibration locale qui permettent l'estimation du diamètre et de la profondeur des défauts.

### **8.4.3 Analyse selon l'approche conventionnelle**

Les résultats cartographiques obtenus avec l'approche conventionnelle sont pertinents en termes de détection du défaut. Les quatre paramètres d'analyse (mobilité moyenne, rigidité dynamique, indice du vide, pente de la mobilité) définis par cette approche décrivent parfaitement l'état des dalles.

Pour les différents cas d'études que nous avons réalisées, la mobilité moyenne la plus élevée correspond aux zones de défaut. La rigidité dynamique est faible dans la zone des défauts. L'indice du vide est faible dans la zone des défauts. La pente de la mobilité moyenne est forte dans la zone des défauts. D'après les résultats :

- Étude pour différentes largeurs du défaut : les résultats du défaut de dimensions de 80 cm \* 80 cm \* 0,2 mm (**Figure 8.15**) et du défaut de dimensions de 80 cm \* 80 cm \* 0,2 mm (**Figure 8.24**) ;
- Étude pour différentes profondeurs du défaut : les résultats du défaut de dimensions de 100 cm \* 100 cm \* 0,2 mm placé à 10 cm de profondeur (**Figure 8.35**) et du défaut de dimensions de 180 cm \* 180 cm \* 0,2 mm placé à 15 cm de profondeur (**Figure 8.44**) ;
- Étude par rapport à la nature de la source d'excitation : les résultats du défaut de dimensions de 40 cm \* 40 cm \* 0,2 mm placé à 5 cm de profondeur excité à une source de fréquence maximale égale à 1000 Hz (**Annexe A.1, Figure A.4**) et du défaut de dimensions de 40 cm \* 40 cm \* 0,2 mm placé à 5 cm de profondeur excité à une source de fréquence maximale égale à 2000 Hz (**Annexe A.1, Figures A.9, 10**) ;
- Étude pour différentes positions du défaut dans la dalle : les résultats du défaut de dimensions de 180 cm \* 180 cm \* 0,2 mm excentré (**Annexe A.1, Figure A.15**) ;
- Étude pour une dalle à multi-défauts : les résultats de trois défauts de dimensions respectives de 60 cm \* 60 cm \* 0,2 mm, 100 cm \* 100 cm \* 0,2 mm et 80 cm \* 80 cm \* 0,2 (**Annexe A.1, Figures A.23**).

On note une nette différence en ce qui concerne l'analyse paramétrique entre une dalle saine et une dalle avec défaut. La mobilité moyenne d'une dalle saine est beaucoup plus faible,  $16.10^{-06}$  m/s.N (**Figure 8.5, A**) comparée à celle d'une dalle avec un défaut de dimensions de 80 cm \* 80 cm \* 0,2 mm placé à 5 cm de profondeur qui est de  $4,5.10^{-05}$  m/s.N (**Figure 8.16, A**).

D'après l'étude paramétrique :

- **Le diamètre** du défaut a un effet sur la détection. Les défauts de taille supérieure à 40 cm \* 40 cm sont détectables. La mobilité moyenne augmente avec la taille du défaut.
- **La profondeur** du défaut affecte également la réponse dynamique. Les défauts situés à 15 cm de profondeur sont difficiles à détecter : le défaut placé à 10 cm de profondeur (**Figure 8.35**) et le défaut placé à 15 cm de profondeur (**Figure 8.44**).
- L'approche ne permet pas de détecter les défauts de petite taille de diamètre inférieur ou égal à 40 cm \* 40 cm lorsque la source de vibration utilisée a une fréquence d'excitation maximale inférieure ou égale à 1000 Hz (**Annexe A.1, Figure A.4**). Ces défauts sont détectés lorsque la fréquence d'excitation maximale de la source utilisée est comprise au moins entre 1000 Hz et 2000 Hz (**Annexe A.1, Figures A.9**) ce qui est prévisible puisque le pic de mobilité maximal associé à la vibration de ce type de défaut se situe entre 1000 Hz et 2000 Hz. Ces défauts sont encore mieux détectables lorsque le traitement des données se fait dans l'intervalle de fréquence entre 1000 Hz et 2000 Hz (**Annexe A.1, Figure A.10**).

Les résultats cartographiques issus de cette approche conventionnelle confirment les résultats de l'approche développée en termes de détection des défauts.

#### **8.4.4 Analyse selon l'approche dite « arithmétique »**

Les résultats fournis par cette approche sont également pertinents. Les défauts sont bien détectés à partir du calcul arithmétique de la mobilité moyenne. Cette approche est intéressante, car très triviale en termes d'analyse. Elle ne repose pas sur des principes fondamentaux solides comparés à l'approche conventionnelle de la RI. Voir les résultats :

- Étude pour différentes largeurs du défaut : les résultats du défaut de dimensions de 80 cm \* 80 cm \* 0,2 mm (**Figure 8.16**) et du défaut de dimensions de 80 cm \* 80 cm \* 0,2 mm (**Figure 8.25**) ;

- Étude pour différentes profondeurs du défaut : les résultats du défaut de dimensions de 100 cm \* 100 cm \* 0,2 mm placé à 10 cm de profondeur (**Figure 8.36**) et du défaut de dimensions de 180 cm \* 180 cm \* 0,2 mm placé à 15 cm de profondeur (**Figure 8.45**) ;
- Étude par rapport à la nature de la source d'excitation : les résultats du défaut de dimensions de 40 cm \* 40 cm \* 0,2 mm placé à 5 cm de profondeur excité à une source de fréquence maximale égale à 1000 Hz (**Annexe A.1, Figure A.5**) et du défaut de dimensions de 40 cm \* 40 cm \* 0,2 mm placé à 5 cm de profondeur excité à une source de fréquence maximale égale à 2000 Hz (**Annexe A.1, Figures A.11, 12**) ;
- Étude pour différentes positions du défaut dans la dalle : les résultats du défaut de dimensions de 180 cm \* 180 cm \* 0,2 mm excentré (**Annexe A.1, Figure A.16**) ;
- Étude pour une dalle à multi-défauts : les résultats de trois défauts de dimensions respectives de 60 cm \* 60 cm \* 0,2 mm, 100 cm \* 100 cm \* 0,2 mm et 80 cm \* 80 cm \* 0,2 (**Annexe A.1, Figures A.24**).

Les résultats obtenus avec cette approche dite arithmétique sont comparables avec ceux obtenus avec l'approche conventionnelle en termes de détection des défauts.

## 8.5 Conclusion

L'étude paramétrique a permis de montrer la pertinence de l'approche développée en termes de détection, d'estimation du diamètre et de la profondeur des défauts. Nous avons vu qu'il est important de bien définir et fixer les paramètres d'analyse afin d'aboutir à des résultats plus réalistes. Les paramètres d'analyse sont définis et ajustés en fonction de la fréquence vibratoire des défauts. Les résultats de l'étude paramétrique obtenus à partir de l'approche d'analyse développée sont très intéressants. Cependant, quelques limites de cette approche sont à noter :

- **La largeur du défaut** : L'approche parvient à détecter et à estimer la profondeur les défauts, dont les dimensions, sont supérieures à 20 cm \* 20 cm de diamètre ;



- **La profondeur du défaut** : L'approche parvient à détecter des défauts situés jusqu'à 15 cm de profondeur. Elle ne permet pas d'estimer la profondeur des défauts situés à plus de 15 cm sous la dalle, car les modes de vibration à cette profondeur sont des modes globaux ;
- **La nature de la source d'excitation** : L'approche ne parvient pas à détecter et à estimer la profondeur des défauts, dont les dimensions, sont inférieures à 20 cm \* 20 cm de diamètre lorsque la source d'excitation choisie est une source de basses fréquences c'est-à-dire ayant une large gamme de fréquences maximum comprise entre 1 et 1000 Hz. Il faut ainsi des sources de hautes fréquences (de gamme de fréquences entre 1 et 4000 Hz par exemple) pour détecter ces défauts dont les fréquences propres se trouvent au-delà de 1000 Hz ;
- **La dalle à multi-défauts** : L'approche parvient à détecter, mais ne parvient pas à estimer la profondeur de chaque défaut dans une dalle affectée par plusieurs défauts notamment proches les uns des autres. Les modes de vibration des défauts (mode de premier ordre) interfèrent les uns les autres pour donner des cartographies de vibration globale. Dans ce cas, on ne peut pas appliquer l'estimation de la profondeur de défauts, car l'hypothèse de calcul est basée sur les cartographies de vibration locale de chaque défaut.

Les résultats obtenus avec l'approche développée ont également été validés en utilisant l'approche conventionnelle et l'approche dite « arithmétique ». Les résultats sont très intéressants en termes de détection des défauts.

L'approche numérique nous a permis de valider l'approche développée. Les résultats obtenus sont prometteurs. Le chapitre suivant sera consacré à la validation expérimentale de l'approche développée afin de confirmer la pertinence des résultats.

# CHAPITRE 9

## MISE EN OEUVRE DU MODÈLE DE VALIDATION EXPÉRIMENTALE DE L'APPROCHE DÉVELOPÉE

### 9.1 Description du programme expérimental

Le volet expérimental a pour but de définir et de réaliser un montage expérimental pour la validation de l'approche développée. L'étude expérimentale a été effectuée sur des dalles de béton dans lesquelles des défauts de tailles variables ont été insérés pour caractériser des défauts tels que les fissurations, les vides et le délaminage dans les structures en béton (plaques minces, dalles de chaussées, dalles de ponts, etc.).

Le programme expérimental a ainsi permis de réaliser huit (8) dalles expérimentales, dont six (6) dalles non armées fabriquées dans le but de mieux contrôler les propriétés mécaniques (la résistance à la compression, le module d'élasticité et le coefficient de Poisson ainsi que les vitesses de propagation des ondes dans le béton) des dalles à savoir :

- Une (1) dalle monolithique sans défaut, dalle expérimentale N°3 (**Annexe B.3, Figure B.14**). C'est une dalle de référence non armée. Les résultats obtenus à partir de cette dalle seront comparés autres dalles avec défauts ou armées ;
- Cinq (5) dalles non armées. Ce sont les dalles expérimentales N°1 (**Figure 9.6**), N°2 (**Annexe B.2, Figure B.11**), N°4 (**Figure 9.7**), N° 5 (**Annexe B.5, Figure B.33**), N°6 (**Annexe B.6, Figure B.37**). La dalle N°5 a été particulièrement fabriquée dans le but de mieux comprendre la réponse dynamique d'une structure lorsque celle-ci est affectée par plusieurs défauts.

Nous avons également réalisé deux (2) dalles armées afin de tenir en compte des conditions plus réalistes étant donné que la majorité des structures en béton sont armées. La conception des dalles armées avait pour but de mieux comprendre l'impact de l'approche développée sur les structures armées en termes de détection et d'estimation des caractéristiques de défauts et de comparer les résultats obtenus à ceux issus d'une dalle non armée. Les deux dalles sont :

- Une dalle (1) monolithique avec barres d'armature et sans défaut (**Annexe B.7, Figure B.38**). C'est une dalle de référence armée ;
- Une dalle (1) monolithique avec barres d'armature et avec défaut. Cette dalle permettra d'étudier le cas des dalles affectées par les délaminages dues à la corrosion des barres d'armature (**Figure 9.8**).

Les dalles fabriquées avec défaut sont caractérisées par différents types de défauts d'adhérence insérés (fissures, vide) ayant des localisations et des géométries bien connues (profondeur sous la surface, taille, ouverture des fissures). Le choix de tels défauts a été fait dans le but de mieux comprendre la réponse dynamique des structures par rapport à ces défauts en réalisant une étude paramétrique détaillée afin de déterminer les limites de chaque approche de traitement des données et notamment l'approche d'analyse développée.

Les défauts insérés dans les dalles sont des défauts orientés horizontalement par rapport au plan longitudinal des dalles, car ce sont les défauts les plus difficiles à détecter contrairement aux défauts verticaux orientés perpendiculairement au plan longitudinal des dalles qui sont souvent observables en surface. Toutes les dalles ont été fabriquées quasiment dans les mêmes conditions en termes de composition et caractéristiques des matériaux, de caractéristiques physico-mécaniques, de processus de maturation et de séchage des dalles afin de permettre une meilleure étude comparative. Deux positions des défauts et des barres d'armature ont été envisagées. La position 1, les défauts et des barres d'armature se situent à 5 cm de profondeur et pour la position 2 en retournant les dalles, les défauts et des barres d'armature se situent à 15 cm de profondeur.

Le **Tableau 9.1** qui résume les différentes dalles fabriquées ainsi que les différents défauts simulés selon l'ordre de fabrication.

Tableau 9.1 : Récapitulatif des dalles fabriquées.

N° des dalles	Dimensions des dalles	Dimensions des défauts	Profondeur des défauts et des barres d'armature	Date de fabrication
1	110 cm * 110 cm * 20 cm	40 cm * 40 cm * 2 mm	5 cm/15 cm	16/04/2015
2	110 cm * 110 cm * 20 cm	40 cm * 40 cm * 0,28 mm	5 cm/15 cm	29/09/2015
3	110 cm * 110 cm * 20 cm	Dalle sans défaut  (Dalle de référence 1)	-	04/11/2015
4	110 cm * 110 cm * 20 cm	80 cm * 80 cm * 0,19 mm	5 cm/15 cm	30/11/2015
5	110 cm * 110 cm * 20 cm	5 cm * 5 cm * 0,19 mm  10 cm * 10 cm * 0,19 mm  15 cm * 15 cm * 0,19 mm  20 cm * 20 cm * 0,19 mm  20 cm * 20 cm * 0,19 mm  30 cm * 30 cm * 0,19 mm  40 cm * 40 cm * 0,19 mm	5 cm/15 cm	02/12/2015
6	110 cm * 110 cm * 20 cm	60 cm * 60 cm * 0,19 mm	5 cm/15 cm	24/02/2016
7	110 cm * 110 cm * 20 cm	Dalle sans défaut + barres d'armature  (Dalle de référence 2)	5 cm/15 cm	19/04/2016
8	110 cm * 110 cm * 20 cm	40 cm * 40 cm * 0,19 mm  + barres d'armature	5 cm/15 cm	16/05/2016

### 9.1.1 Étapes de fabrication des dalles

Nous allons décrire brièvement dans cette sous-partie les différentes étapes qui ont conduit à la conception des dalles c'est-à-dire les étapes de préparation et huilage des moules, de composition des matériaux utilisés et de correction de l'eau dans le sable, de préparation du béton, de mesure des caractéristiques du béton, de mise en place des défauts et barres d'armature, du coulage du béton, de processus de mûrissement et de séchage des dalles, de mesure des caractéristiques mécaniques des dalles.

➤ **Composition des matériaux de fabrication des dalles et correction d'eau dans le sable.**

Les principaux matériaux utilisés sont le sable, les granulats de type P5-14 (petits granulats) et de type P20 (gros granulats), du ciment ordinaire de type GU et de l'eau (**Figure 9.2**).

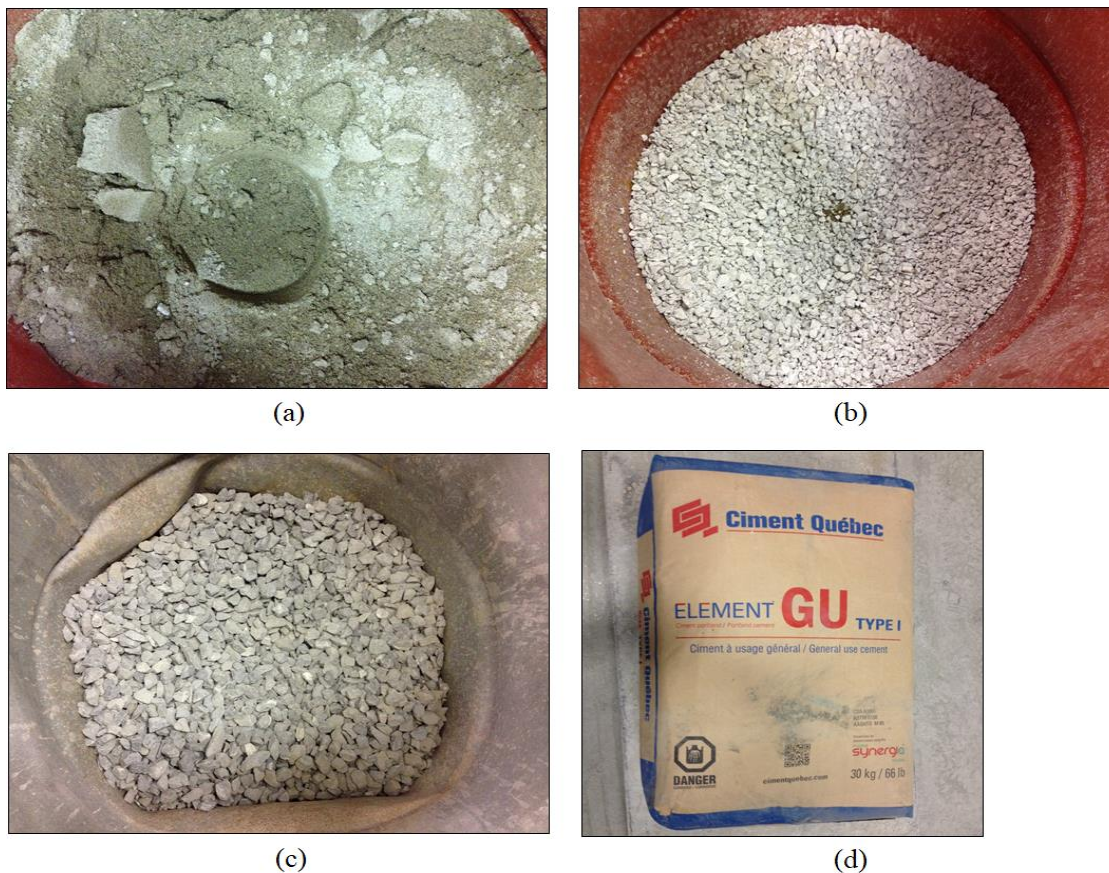


Figure 9.1 : Matériaux : (a) Sable, (b) Granulats P5-14, (c) Granulats P20, (d) Ciment ordinaire GU.

Le béton fabriqué est un béton de type ordinaire dont le rapport E/C devrait être proche de 0.6. Ce rapport est souvent utilisé. Le béton obtenu dispose d'une assez bonne ouvrabilité, tout en ayant une meilleure résistance.

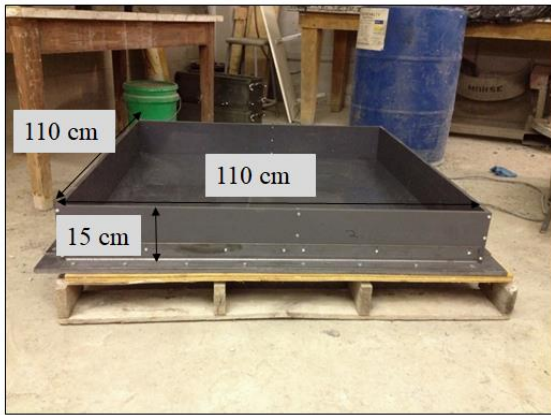
La composition et les quantités des matériaux pour aboutir à un rapport E/C de 0.6 utilisées après la correction de l'eau dans le sable sont consignées dans le **Tableau 9.2**.

Tableau 9.2 : Caractéristiques des matériaux pour une gâchée de  $0,5 \text{ m}^3$ .

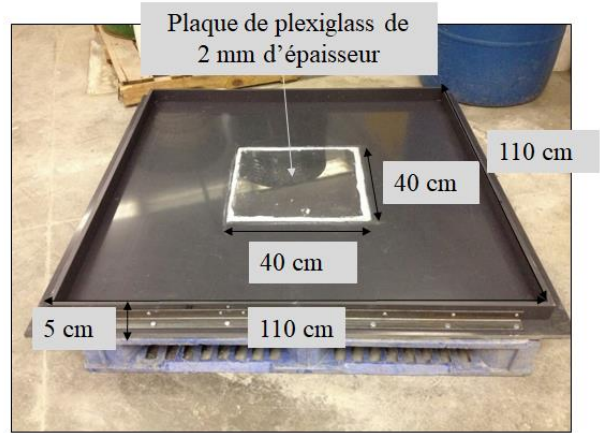
Composantes	Proportions de composantes ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
Dosage en eau	186,6
Dosage en sable	857,8
Dosage en ciment type GU Ciment ordinaire	310
Dosage en pierre de calibre : P5-14	607
Dosage en pierre de calibre : P20	404

### ➤ Préparation et huilage des moules

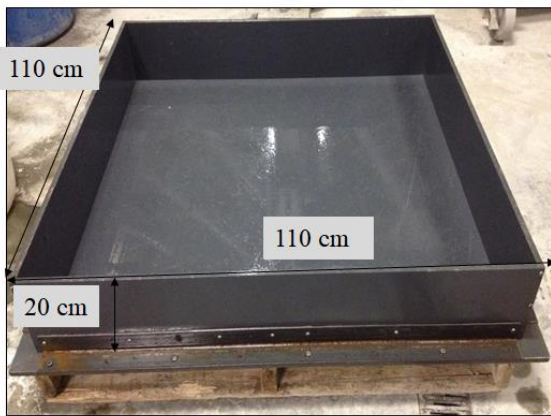
La figure 9.1 représente les différents moules utilisés pour la fabrication des dalles expérimentales. Avant chaque fabrication, les moules étaient huilés afin d'éviter que le béton ne percole les parois de ceux-ci après séchage et rende leur nettoyage difficile.



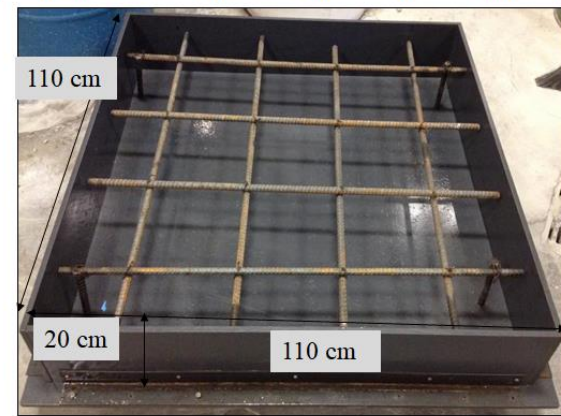
(a- Moule de 110 cm x 110 cm x 15 cm )



(b- Moule de 110 cm x 110 cm x 5 cm + défaut simulé)



(c- Moule de 110 cm x 110 cm x 20 cm )



(d- Moule de 110 cm x 110 cm x 20 cm + armatures )



(e- Moules de cylindre )

Figure 9.2 : Préparation des moules.



### ➤ Préparation du béton

La préparation du béton a nécessité l'utilisation des malaxeurs de volumes entre  $0,15 \text{ m}^3$  et  $0,5 \text{ m}^3$  (Figure 9.3).

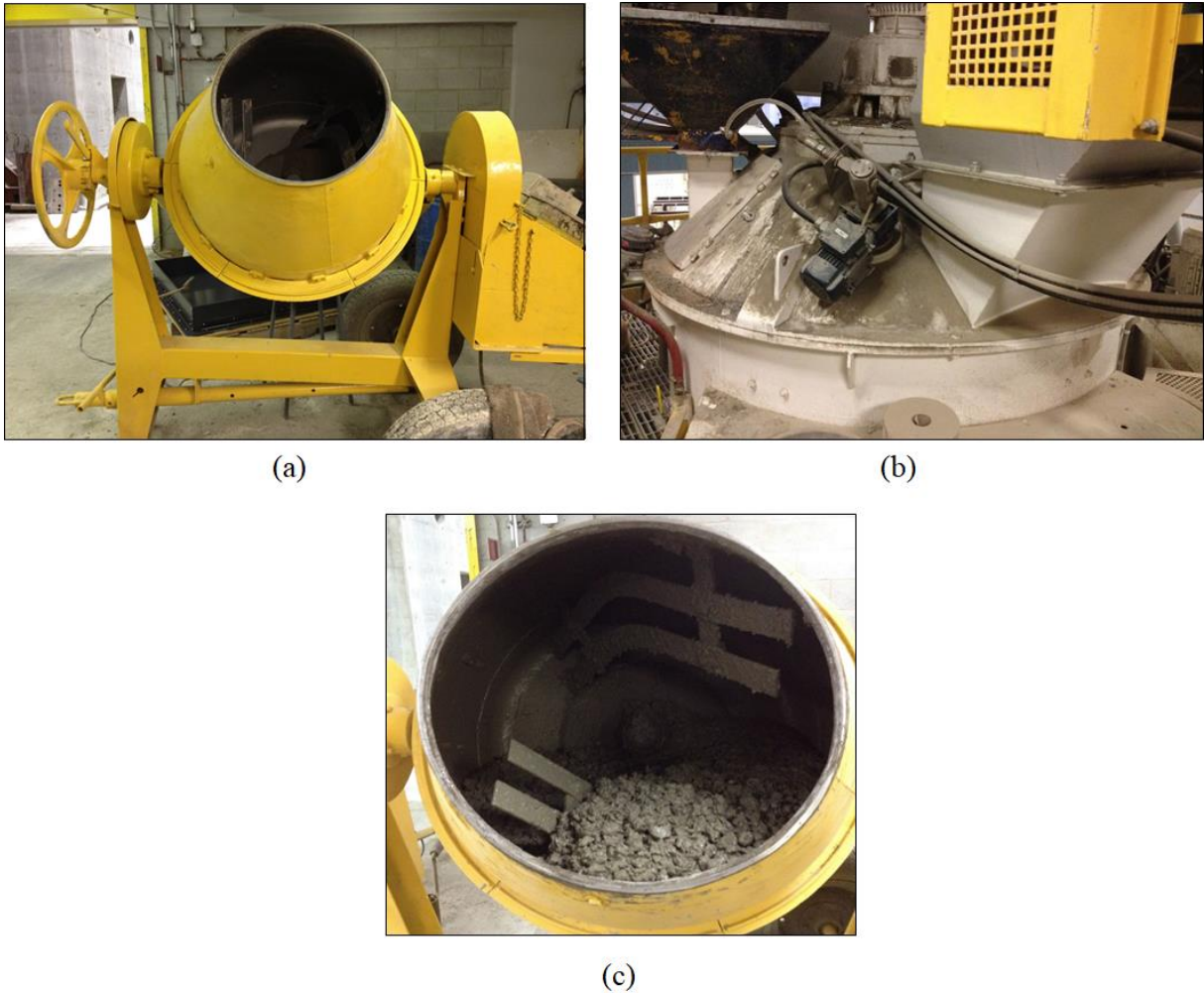


Figure 9.3 : Préparation du béton, (a) Malaxeur de  $0,15 \text{ m}^3$ , (b) Gros malaxeur usine de béton de  $0,5 \text{ m}^3$ , (c) Malaxage du béton.

La préparation du béton s'est faite selon les normes requises en plusieurs phases. Les différentes phases selon l'ordre de préparation sont :

- Mise du sable dans le malaxeur ;
- Malaxage ;
- Mise du gravier P5-14 et P20 dans le malaxeur ;



- Malaxage ;
- Mise des 3/4 de la quantité totale d'eau ;
- Mise du ciment ;
- Malaxage ;
- Mise de 1/4 de la quantité totale d'eau restante ;
- Malaxage pendant 10 à 15 minutes et fin de la préparation.

### ➤ Mesure des caractéristiques du béton

Après la formulation du béton, nous avons procédé à quelques mesures afin d'évaluer les caractéristiques du béton à savoir l'affaissement du béton, la teneur en air et la masse volumique du béton (**Figure 9.4**).

L'essai d'affaissement se fait selon la procédure d'essai décrite par la norme NFP-18-451. Il permet de vérifier la consistance du béton. Un béton très ferme aura ainsi un affaissement entre 0 et 3 cm, un béton plastique aura un affaissement de 5 à 9 cm, un béton très plastique aura un affaissement de 10 à 15 cm (dalles armées) et un béton fluide un affaissement supérieur à 16 cm. Le béton fabriqué était un béton plutôt très plastique. Le test de la mesure de la teneur en air du béton se fait selon la norme EN-12350-7.

Le **Tableau 9.3** représente un exemple des mesures sur des caractéristiques du béton, effectuées sur la dalle N° 4.

Tableau 9.3 : Mesures des caractéristiques du béton – Dalle N° 4.

Mesures des caractéristiques du béton	Valeurs
Affaissement du béton (cm)	17
Air dans le béton (%)	1,5
Masse du béton (g)	16658
Masse volumique du béton ( $kg/m^3$ )	2376



Figure 9.4 : Mesures sur le béton, (a) L'affaissement du béton à l'aide du Cône d'Adams, (b) Mesure de l'air contenu dans le béton, (c) Mesures de la masse et de la densité du béton.

### ➤ Mise en place des défauts, des barres d'armature et coulage des dalles

- Mise en place des défauts : plaque de plexiglas et polyéthylène

La mise en place ou l'insertion des défauts (fissurations, vides, nid-d'abeilles, etc.) dans les structures en béton d'expérimentation reste toujours un grand défi pour les chercheurs. Cela nécessite donc beaucoup de créativité et d'originalité pour y arriver.

Ainsi, pour réaliser les dalles avec un défaut interne tel qu'un vide ou une fissuration afin de simuler une perte d'adhérence, nous avons d'abord pensé à élaborer une procédure originale. La procédure consistait à fabriquer une dalle monolithique (dalle 1) à partir de deux dalles (dalles 1a et 1b). Les étapes de fabrication sont les suivantes (**Figure 9.6**) :

- 1- Fabrication de deux moules (un moule de dimensions : 110 cm \* 110 cm \* 5 cm et un moule 1b de dimensions : 110 cm \* 110 cm \* 5 cm ;
- 2- Fixation du défaut simulé (plaque de plexiglas) au fond du moule 1b ;
- 3- Remplissage des moules 1a et 1b avec du béton frais ;
- 4- Obtention du défaut (vide d'air) après décoffrage du moule 1a et retrait de la plaque de plexiglas ;
- 5- Application de la résine d'époxy sur les deux dalles fabriquées (dalles 1a et 1b) après la période de séchage ;
- 6- Fixation des dalles 1a et 1b et obtention de la dalle 1 avec un défaut simulé (vide d'air) de dimensions de 40 cm \* 40 cm \* 2 mm.

Les moules en PVC ont été préférés afin d'obtenir des surfaces des dalles assez planes pour faciliter un meilleur contact lors de leur fixation, car la qualité des mesures allait dépendre des conditions de mise en place des dalles de béton.

Cette procédure n'a servi qu'à la fabrication de la dalle N° 1 (**Figure 9.6**) caractérisée par un vide de dimensions 40 cm \* 40 cm \* 2 mm. La procédure n'a pas été poursuivie sur les autres dalles du fait de sa complexité d'application notamment lors de la fixation des deux dalles. Du fait des courbures développées sur les dalles lors du processus de séchage, l'utilisation de la colle d'époxy n'a pas permis de bien fixer les deux compartiments surtout au niveau des extrémités. D'où la décision d'avoir renoncé à cette procédure de fabrication car la réponse dynamique du défaut sollicitée aurait pu être affectée par les conditions de conception des dalles.

Nous avons ainsi utilisé une autre procédure de mise en place des défauts afin d'avoir des dalles monolithiques et homogènes. Nous avons utilisé le polyéthylène (**Figure 9.5**) pour servir de défaut ou de vide d'air dans le béton. Le choix d'utilisation du polyéthylène est le fait que ses propriétés mécaniques soient proches de celles de l'air avec une vitesse de propagation des

ondes de compression autour de 340 m/s, mais surtout pour des raisons pratiques, car il est toujours très difficile d'insérer dans les structures en béton dédiées aux études expérimentales des défauts plus ou moins réalistes (vides d'air, fissurations, etc.).

Pour simuler un tel défaut, le moule de 20 cm de profondeur est rempli en deux étapes :

- Une première couche de béton de 15 cm d'épaisseur est d'abord déposée dans le fond ;
- La surface du béton est nivelée puis le polyéthylène est déposé sur le béton frais.
- La deuxième étape consiste à combler le moule avec une couche de béton de 5 cm d'épaisseur.

C'est cette approche qui a été utilisée pour simuler les défauts dans les dalles : Dalle N° 2 (Annexe B.2, **Figure B.11**), Dalle N° 3 (Annexe B.3, **Figure B.14**), Dalle N° 5 (Annexe B.5, **Figure B.33**), Dalle N° 6 (Annexe B.6, **Figure B.37**), Dalle N° 7 (Annexe B.6, **Figure B.38**).

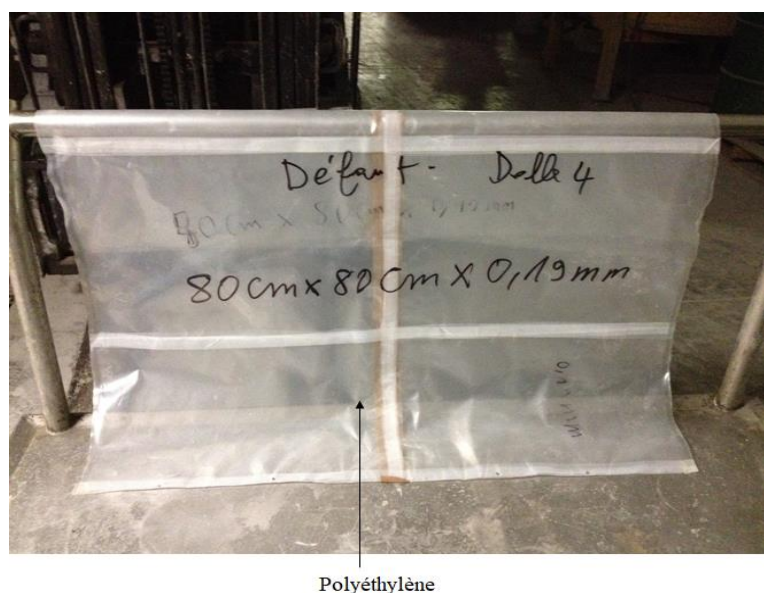


Figure 9.5 : Défaut simulé de polyéthylène.

- **Mise en place des barres d'armature**

Les caractéristiques des barres d'armature qui ont servi à la fabrication des dalles armées, dalle N° 7 (**Figure 9.12**) et dalle N° 8 (**Figure 9.13**) sont consignées dans le Tableau 9.4.

Tableau 9.4 : Caractéristiques des barres d'armature.

Type	Nombre des barres d'armature par direction	Longueur des barres d'armature (mm)	Direction des barres d'armature dans les dalles	Diamètre des barres d'armature (mm)	Espacement des barres d'armature dans les dalles (mm)
15 M	4	1080	Longitudinale et transversale	16	250

- **Dalle N° 1 : Mise en place du défaut et coulage du béton**

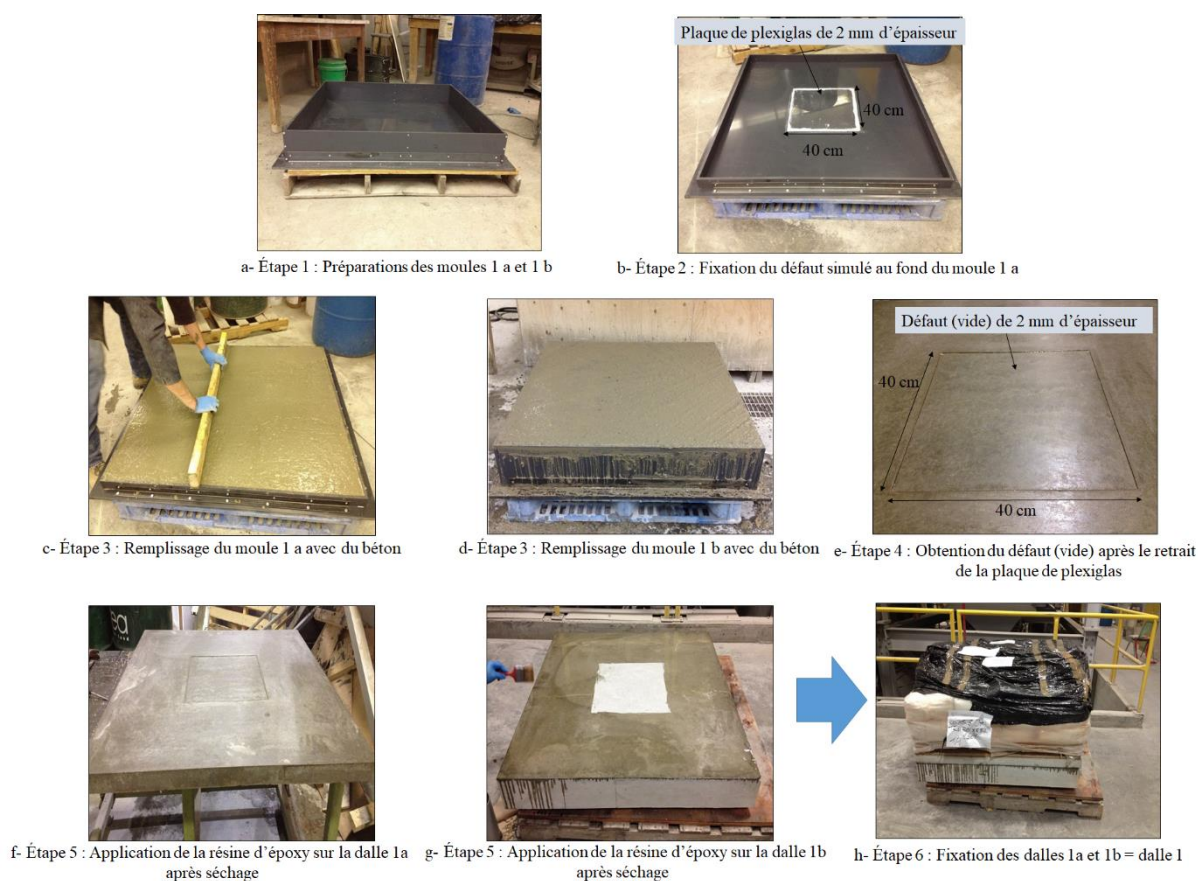


Figure 9.6 : Dalle expérimentale N° 1- Protocole de fabrication



- **Dalle N° 4 : Mise en place du défaut et coulage du béton**

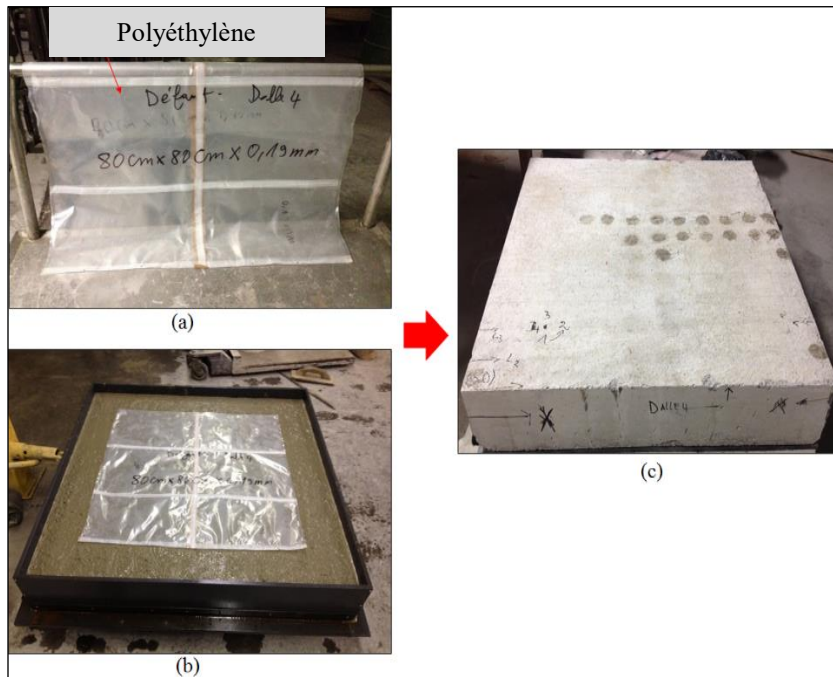


Figure 9.7 : Dalle N° 4, (a) Mise en place du béton, (b) Remplissage du moule, (c) Dalle monolithique finale.

- **Dalle N° 8 : Mise en place du défaut, des barres d'armature coulage du béton**

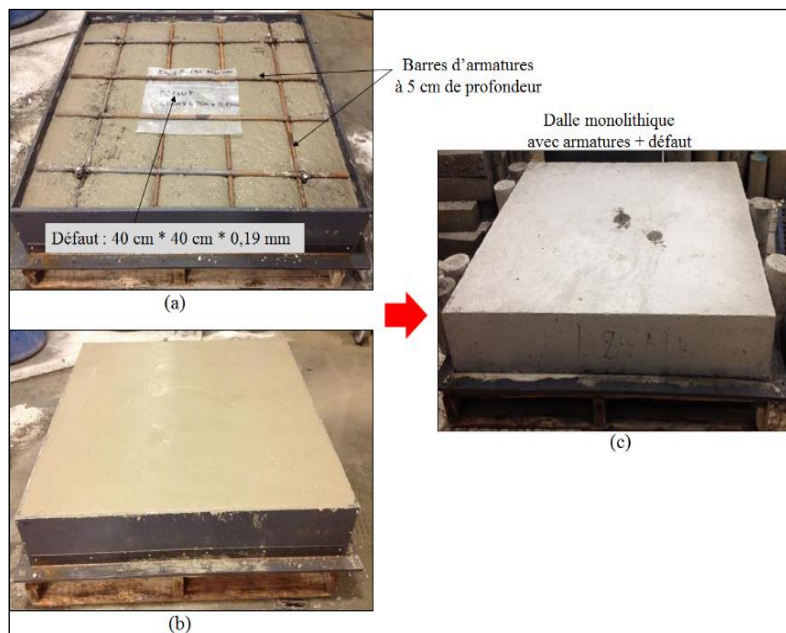


Figure 9.8 : Dalle N° 8, (a) Mise en place des barres d'armature et du défaut, (b) Remplissage du moule, (c) Dalle monolithique finale.

➤ **Processus de mûrissement humide, de séchage des dalles et des cylindres de béton**

Après le coulage des dalles et des cylindres de béton, nous avons procédé à la mise en place des structures dans une chambre humide (**Figure 9.9**). L'arrosage et la vaporisation sont les méthodes de cure qui ont été utilisées (température ambiante  $\geq 10$  °C et faible taux d'humidité relative). Les dalles ont été conservées dans les mêmes conditions de mûrissement entre 18 jours et 28 jours afin d'obtenir 40 à 70 % de la résistance à la compression du béton régulier recherchée pour l'ensemble du protocole expérimental.



Figure 9.9 : Mise en place des dalles (a) et des cylindres (b) dans la chambre humide.

Après la période de mûrissement, les dalles et les cylindres de béton ont été démoulés puis soumis au séchage (**Figure 9.10**) pendant au moins 28 jours à la température ambiante du laboratoire de 25 °C.

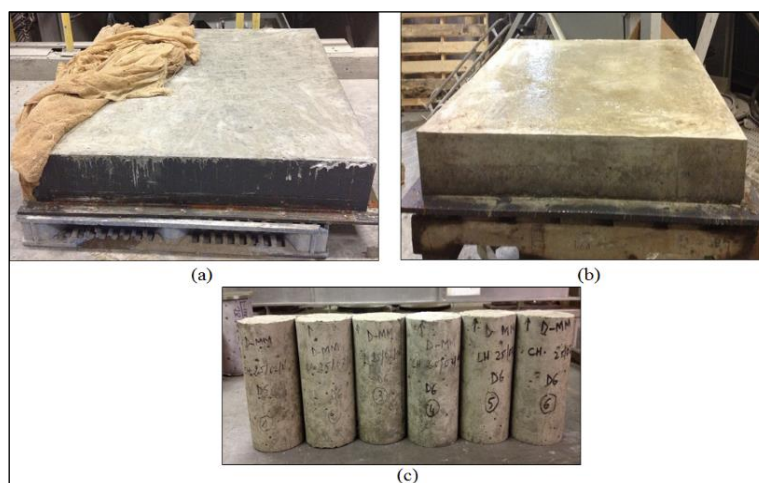


Figure 9.10 : Sortie de la chambre humide (a), démoulage puis séchage des dalles (b) et cylindres (c).

### 9.1.2 Mesures des caractéristiques mécaniques des dalles

Pour déterminer les propriétés mécaniques des dalles, les essais mécaniques au laboratoire ont été réalisés sur des cylindres de béton après les phases de murissement et de séchage. Avant de procéder aux mesures, les extrémités des cylindres de béton ont été lissées au moyen d'une surfaceuse (**Figure 9.11**) dans le but de favoriser les meilleurs contacts entre les échantillons et l'appareillage lors des différents tests afin d'enregistrer des résultats.



Figure 9.11 : Opération de polissage des cylindres de béton à l'aide d'une surfaceuse.

Les essais réalisés sont la mesure de la résistance à la compression et la mesure du module d'élasticité de chaque dalle. Ces mesures sont nécessaires, car elles serviront pour la modélisation numérique.

#### ➤ Résistance à la compression

Les mesures de la résistance à la compression ont été réalisées à l'aide du dispositif représenté sur la **Figure 9.12**. Les mesures ont été effectuées sur trois échantillons.



La résistance à la compression de chaque dalle a été obtenue en moyennant la résistance à la compression sur trois échantillons. La valeur moyenne obtenue a ensuite été utilisée pour la détermination du module d'élasticité de la dalle.

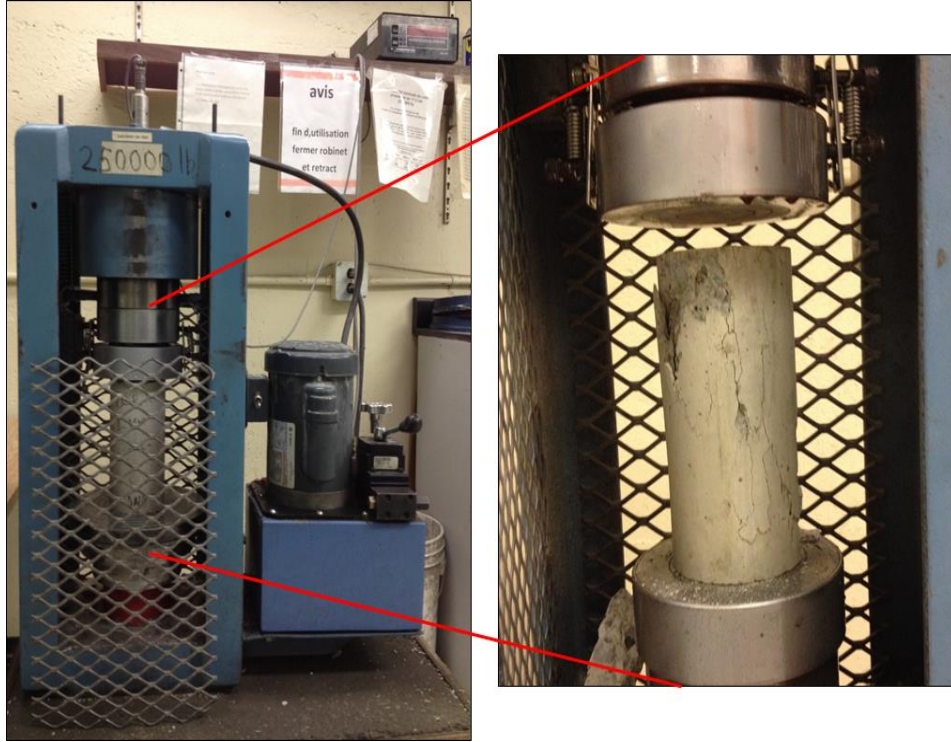


Figure 9.12 : Mesure de la résistance à la compression à l'aide d'une presse spécialisée.

### ➤ Module d'élasticité

Les mesures du module d'élasticité ont été effectuées à l'aide du dispositif représenté sur la **Figure 9.13**. Les mesures ont été effectuées sur 2 échantillons. Le module d'élasticité pour chaque dalle a été calculé en moyennant les modules d'élasticité des deux échantillons. Par exemple, le module d'élasticité moyen du béton de la dalle N° 1 était égal à 36,1 GPa (**Figure 9.14**).

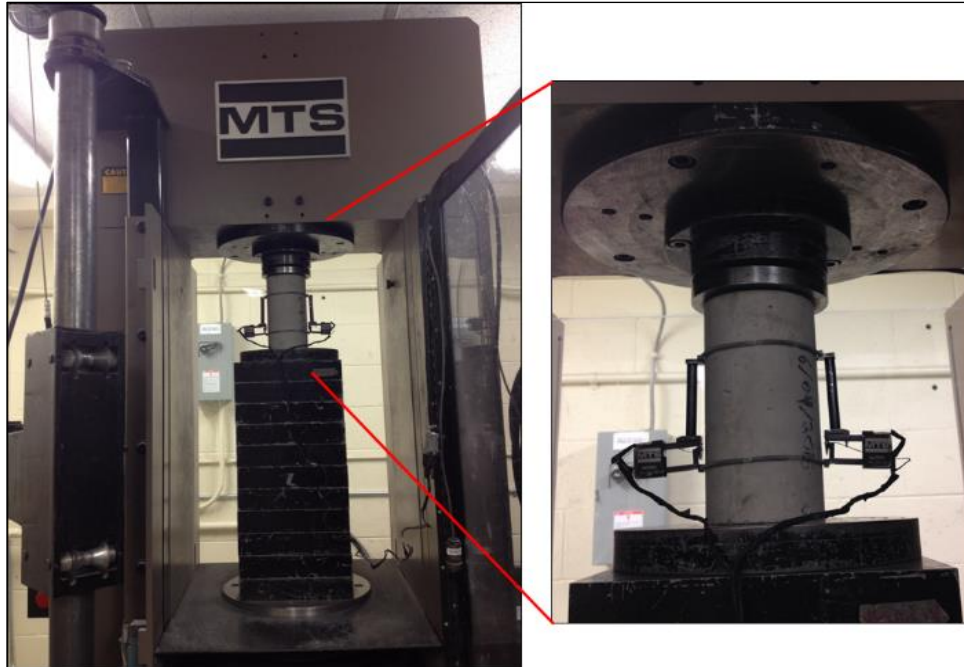


Figure 9.13 : Mesure du module d'élasticité à l'aide d'une presse de marque MTS.

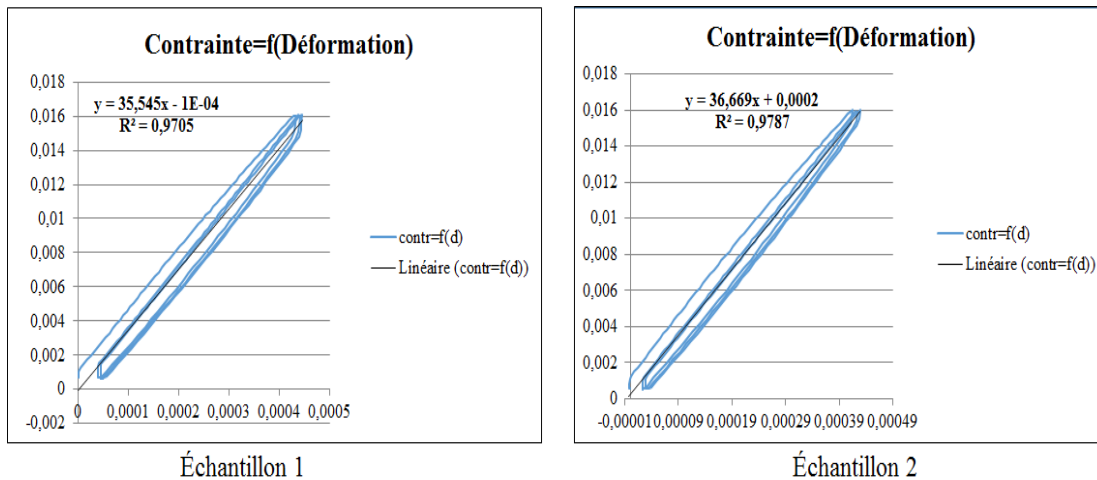


Figure 9.14 : Résultat de mesure du module d'élasticité – Dalle N° 1.

Les caractéristiques mécaniques mesurées sont résumées dans le **Tableau 9.5**. Nous sommes parvenus à mettre en œuvre des dalles avec propriétés mécaniques assez proches afin de mieux comparer les résultats. Le module d'élasticité moyen (**35,5 GPa**) et la densité moyenne (**2399 kg/m<sup>3</sup>**) des dalles sont caractéristiques des propriétés d'un béton ordinaire.

Ces propriétés mécaniques ont ensuite été utilisées dans la simulation numérique pour la validation des résultats expérimentaux.

Tableau 9.5 : Résumé des propriétés mécaniques du béton des dalles.

N° Dalles	Module d'élasticité (GPa)	Résistance à la compression (MPa)	Densité du béton frais (kg/m <sup>3</sup> )	Coefficient de Poisson	Nombre de jours dans la chambre humide
<b>1</b>	36,1	39,9	2394	0,2	28
<b>2</b>	35,6	40,9	2390	0,2	21
<b>3</b>	34,3	41,4	<b>2358</b>	0,2	18
<b>4</b>	37	41,5	2376	0,2	18
<b>5</b>	34,4	40,9	2436	0,2	18
<b>6</b>	35,1	41,1	2376	0,2	18
<b>7</b>	36,4	39,5	<b>2445</b>	0,2	19
<b>8</b>	35,5	39,9	2420	0,2	20
<b>Moyenne</b>	<b>35,5</b>	<b>40,6</b>	<b>2399</b>	<b>0,2</b>	<b>20</b>

## 9.2 Description du matériel et configuration des mesures de la RI

### 9.2.1 Le matériel de mesure

Le matériel utilisé pour les mesures est constitué (**Figure 9.14**) de :

- **Un géophone (1)** pour enregistrer les vitesses de vibrations ;
- **Un marteau (2)** à impulsion muni d'une cellule de charge qui enregistre la force d'impact ;
- **Un PC (3)** doté d'un logiciel d'acquisition, d'amplification, de traitement, d'analyse, d'affichage et de stockage des données ;
- **Un système d'acquisition (4)** des données, muni d'un canal d'entrée du marteau muni d'une cellule de charge, un canal d'entrée du géophone. La fréquence d'échantillonnage

est de 10kHz et le nombre de points de mesure correspond à 1024 points. Nous avons utilisé un système d'acquisition de marque HS4 MultiChanel muni d'un logiciel qui permet le traitement et l'affichage des signaux (force, vitesse et mobilité) ;

- **Un conditionneur (5)** utilisé pour l'amplification des signaux ;
- **Un couplant (6)** utilisé pour fournir une meilleure adhésion entre le capteur et la structure afin d'éviter la perte de l'information. Nous avons souvent utilisé comme couplant le miel ou la vaseline ;
- **Des câbles de connexion BNC (7)** permettent la connexion du matériel ;

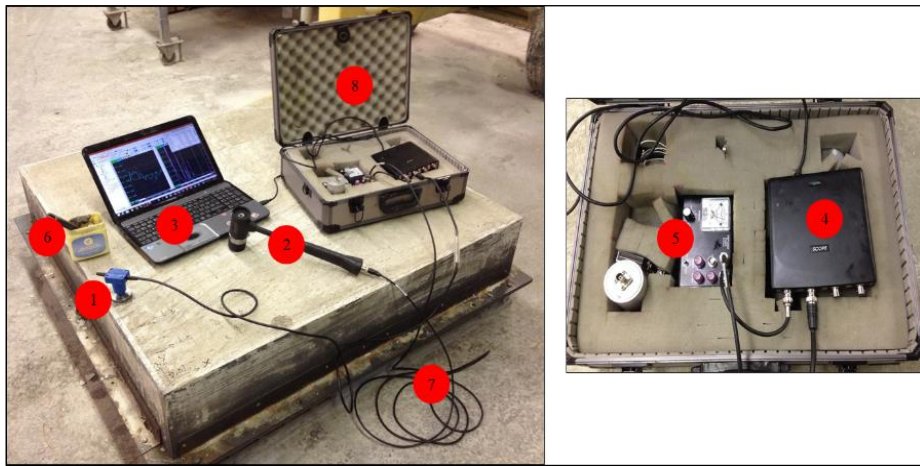


Figure 9.15 : Matériel d'acquisition de la méthode la RI.

L'enregistrement de la vibration des dalles s'est fait au moyen d'un géophone dont la fréquence naturelle est inférieure à 15 Hz et dont la sensibilité constante est comprise entre 15 et 1000 Hz. Le transducteur de vitesse est un capteur sensible à la vitesse de vibration des particules et est préféré par rapport à l'accéléromètre du fait de sa stabilité à de basses fréquences et sa performance robuste dans la pratique [5].

Le géophone utilisé est de marque GS-20DX (**Figure 9.15**) fabriqué par la société Geospace Sensors. Ce géophone est compatible avec toutes les plates-formes d'acquisition standard de l'industrie. Il est notamment utilisé pour l'acquisition des données de 2D et 3D dans le domaine de la sismique terrestre ou marine ou dans des milieux de transitions.

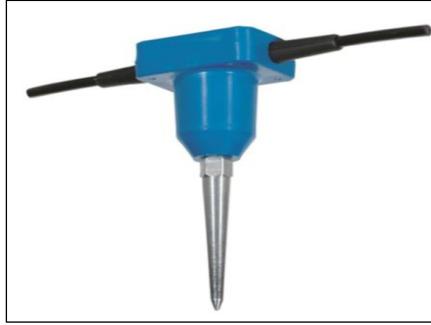


Figure 9.16 : Géophone de type GS-20DX.

Pour obtenir des mesures sur le béton avec ce géophone, nous avons fabriqué un embout plat en acier inoxydable de forme cylindrique (**Figure 9.16-1**) adapté qui adhère parfaitement au béton. Grâce au couplant utilisé (gel de vaseline ou miel), ce dispositif a pour but de limiter la perte des signaux mesurés.

#### 9.2.1.1 Sources

La méthode de RI utilise généralement une source de faible impact pour générer une excitation mécanique à la surface du matériau. La source est un marteau de 1 kg avec un embout de 50 mm de diamètre cylindrique capable de générer des vibrations dont les fréquences peuvent atteindre 5 kHz dépendamment de la nature de l'embout [8], entre 0 à 1000 Hz pour un marteau dont l'embout est en caoutchouc et entre 0 et 3000 Hz pour un marteau dont l'embout est en aluminium. Le **Tableau 9.6** présente les différents types d'embouts en fonction des fréquences générées.

En termes de niveaux de contraintes, des pics de contrainte varient entre 5 MPa pour des marteaux dont l'embout est en caoutchouc et 50 MPa pour ceux dont l'embout est en aluminium [1]. Le marteau est muni d'une cellule de charge capable de mesurer des forces dynamiques pouvant atteindre 20 kN [3, 41]. La fréquence de résonance de la cellule de charge peut excéder 10 kHz [3]. L'énergie libérée est approximativement 100 fois plus importante que celle générée lors des relevés par la technique d'impact-écho. Cette quantité d'énergie importante signifie que la réponse dans le cas des structures en plaque correspond aux basses fréquences (fréquences comprises entre 0 et 800 Hz) contrairement à la technique impact-écho qui utilise le mode de réflexion de plus hautes fréquences (fréquences comprises entre 2-50 kHz) [10].

Tableau 9.6 : Différents types d'embouts et leur gamme de fréquences générée (Gassman, 1997) [35].

Hammer Tip	Color	Frequency Range
Hard Rubber	Black	0 to 2000 Hz
Medium Rubber	Red	0 to 800 Hz
Soft Rubber	Brown	0 to 650 Hz
Very Soft Rubber	Grey	0 to 600 Hz
Hardest	Aluminum	0 to 5000 Hz

La contrainte de compression maximale au point d'impact dans le béton est directement liée aux propriétés élastiques de la pointe de marteau. Ainsi il a été constaté qu'au-delà d'un rayon de 600 mm du point d'un impact, le géophone ne parvenait plus à enregistrer le signal émis [2]. La variation de force d'impact appliquée dans le domaine temporel est représentée sous forme de demi-sinus ou de demi-sinus inverse (**Figure 9.17**). Le temps de contact entre le marteau et le point d'impact est à considérer. La fréquence maximale du spectre est inversement liée à la durée de l'impact. Le temps de contact est environ inférieur à 0,5 ms pour une source pouvant générer des fréquences jusqu'à 2000 Hz. Ainsi la plus grande quantité d'énergie générée par un impact est transmise en dessous des fréquences inversement proportionnelles au temps de contact.

Dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé trois types d'embouts (**Figure 9.16**). Les trois sources ont été utilisées afin de mieux comprendre leur sensibilité de détection notamment par rapport aux caractéristiques (taille, épaisseur, profondeur) des défauts dans les dalles expérimentales. Les caractéristiques des embouts sont consignées dans le **Tableau 9.7**.

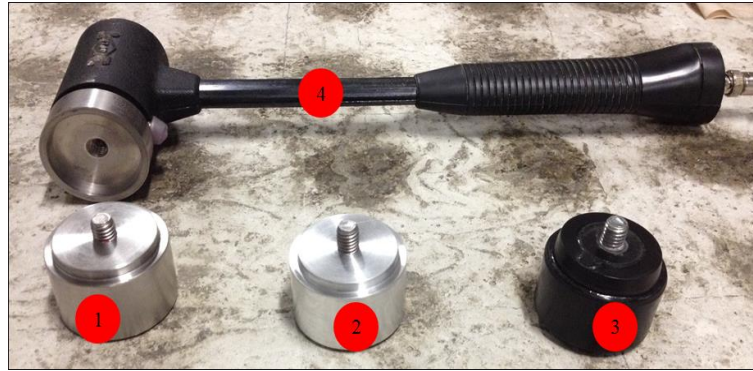


Figure 9.17 : Les différentes sources d'énergie, 1- Embout en acier inoxydable, 2- Embout en aluminium, 3- Embout en PVC et 4- Marteau muni d'un capteur de force.

Tableau 9.7 : Différents types de sources (embouts) utilisées selon la norme ASTM C1740.

Nature de l'embout	Gamme de fréquences (Hz)	Masse (g)
PVC	0 et 1200	1144
Aluminium	0 et 3000	1226.5
Acier	0 et 4000	1550

### 9.2.2 Vérification du fonctionnement du matériel et validation des données

Les mesures de la RI peuvent être affectées par les conditions de mesure et de réglage des appareils de mesures. Avant de procéder aux mesures, le capteur (géophone), la source (Marteau) et le système d'acquisition ont été testés et calibrés.

Après chaque relevé, on procède à une vérification des données. Il faut s'assurer que :

- Le signal de la force dans le domaine temporel a une forme de demi-cercle et le domaine fréquentiel une forme sinusoïdale ayant une tension de base constante (**Figure 9.17**, en haut à gauche).
- La forme d'onde de vitesse du transducteur valable a une tension de base constante, avec la réponse du signal oscillant entre 10 et 15 fois environ la valeur de base et une amplitude diminuant de façon continue [3]. C'est une indication que le transducteur de



vitesse est stable au cours de l'acquisition de données et qu'aucune vibration parasite n'affecte pas les mesures (**Figure 9.17**, en haut à droite). Un signal de vitesse non valable du fait de l'instabilité du transducteur entraîne une variation importante de la tension de base sur la forme d'onde (**Figure 9.18**, en haut à droite) et un pic d'amplitude large à de basses fréquences sur la courbe de mobilité (**Figure 9.18**, en bas).

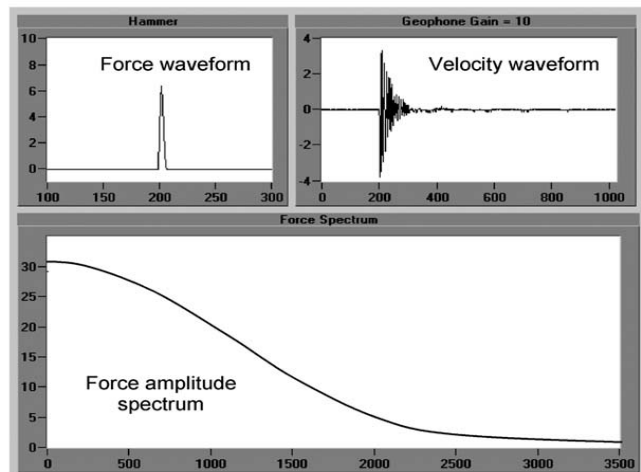


Figure 9.18 : Formes des signaux valables : signal temporel de force en haut à droite), signal temporel de vitesse (en haut à gauche), signal fréquentiel de force (en bas) [3].

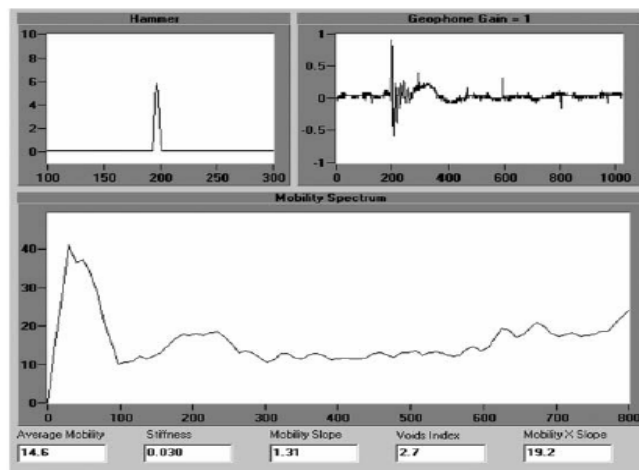


Figure 9.19 : Forme d'onde non valable causée par l'instabilité du géophone : signal temporel de force en haut à droite), signal temporel de vitesse (en haut à gauche), signal fréquentiel de force (en bas) [3].



Si les formes d'ondes à la fois du marteau et du transducteur sont validées, on valide également la courbe de mobilité spectrale (**Figure 9.19**). Les données sont ensuite enregistrées et stockées pour des analyses.

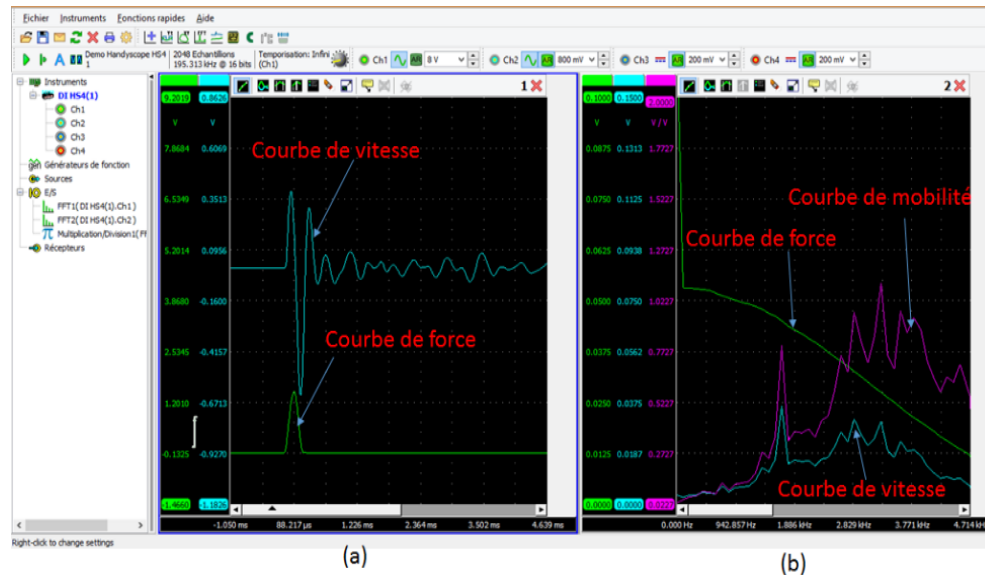


Figure 9.20 : Signaux enregistrés par le système d'acquisition HS4 Multichannel, (a) signaux (vitesse et force) dans le domaine temporel, (b) signaux (vitesse, force et mobilité) dans le domaine fréquentiel.

### 9.3 Matériel et configuration des mesures des autres méthodes non destructives utilisées

#### 9.3.1 Thermographie infrarouge

Les mesures ont été effectuées à l'aide d'une caméra à infrarouge de marque « VarioCAM high resolution » (**Figure 9.20**) conçue pour la recherche et le développement dans les domaines scientifiques et industriels. Elle est utilisée entre autres dans l'inspection des installations électriques et mécaniques, l'inspection des matériaux, le contrôle de l'isolation thermique des bâtiments, la détection des défauts de surface dans le domaine de génie civil, etc.

C'est une caméra facile d'utilisation, de haute précision et résolution. Les images enregistrées peuvent être traitées à l'aide du logiciel « VarioAnalyze PRO » compatible avec la caméra infrarouge « VarioCAM high resolution ». Le logiciel permet de gérer, analyser et évaluer les images et les séquences d'images infrarouges. Les données peuvent être ensuite représentées

sous forme de diagrammes ou histogrammes pour des analyses. Les mesures peuvent être prises dans une gamme de température comprise entre  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Figure 9.21 : Caméra de thermographie infrarouge « VarioCAM high resolution ».

Nous avons utilisé la thermographie passive (**Figure 9.21**). Les dalles ont été exposées au rayonnement solaire contrairement à la thermographie active qui utilise une source d'excitation extérieure maîtrisée (lampes halogènes, excitation par ultrasons ou excitation thermique par courant induit, etc.). En analysant ainsi le rayonnement solaire émis sur les dalles, il est possible de détecter les défauts de surface ou sous la dalle de béton (fissurations, vides, délaminages ou la corrosion des barres d'armature). Les images obtenues représentent ainsi la température de la surface de la structure inspectée. Les zones de fortes températures correspondent aux zones problématiques.



Figure 9.22 : Mesures par thermographie infrarouge.

### 9.3.2 Essai sonique

Les mesures soniques ont été réalisées sur les dalles pour mesurer les vitesses des ondes de compression dans le béton. Le but des mesures est de pouvoir distinguer les zones de faibles vitesses, zones supposées affectées par les dégradations (vides, délaminages, etc.) et les zones de fortes vitesses, zones supposées saines. L'équipement utilisé est décrit dans la **Figure 9.22** est constitué :

- Un capteur émetteur (1) ;
- Un capteur récepteur (2) ;
- Des câbles de connexion BNC (3) ;
- Un système d'acquisition (le Pundit) (5).

Les mesures réalisées sont des mesures de transmission directe, les transducteurs d'émission et de réception de 54 kHz fixés sur le béton à l'aide d'un couplant (miel ou gel de pétrole) sont disposés le plus possible en face l'un de l'autre afin d'éviter une perte considérable du signal (**Figure 9.23**) au risque de sous-estimer les résultats. Les mesures ont été effectuées avec un pas de mesure de 10 cm par ligne sur les mêmes positions que les mesures de la RI afin de mieux comparer les résultats.

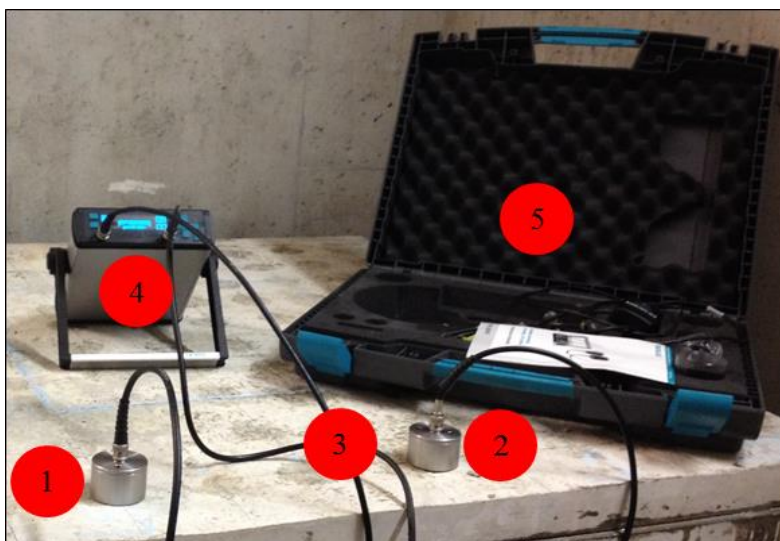


Figure 9.23 : Matériel d'Essai sonique.



Figure 9.24 : Configuration et mesures soniques sur les dalles expérimentales.

L'analyse des résultats se fera à partir de l'échelle des vitesses de propagation des ondes de compression en fonction de l'état du béton, proposée par Solis-Carcaño et Moreno, 2008 (**Tableau 9.8**).

Tableau 9.8 : Classification du béton selon la vitesse de propagation (m/s) (Solis-Carcaño et Moreno, 2008).

Vitesses de propagation (m/s)	État du béton
[0 – 2135]	Très mauvais
]2135 – 3050]	Mauvais
]3050 – 3660]	Moyen
]3660 – 4575]	Bon
> 4575	Très bon

### 9.3.3 Géoradar

Comme les mesures soniques, les mesures géoradar ont été effectuées sur les mêmes positions que les mesures de la RI. Pour des dalles de béton de 20 cm d'épaisseur, nous avons utilisé des antennes (antennes émettrice et réceptrice) de 2 GHz capables de détecter et de détecter les défauts (vides, nids d'abeille, barres d'armature, fond de la dalle, etc.) situées à des profondeurs inférieures à 40 cm. Le dispositif d'acquisition des données utilisé est (**Figure 9.24**) est constitué :

- Un système d'acquisition (1) ;
- Une batterie d'alimentation (2) ;
- Un PC doté d'un logiciel de traitement des données (RADAN ou ReflexW) (3) ;
- Une antenne de 2 GHz (4) ;
- Un câble de connexion (5).

Les résultats seront présentés sous forme de cartographies en 2 D et en 3D puis seront interprétés de façon à évaluer la capacité de cette technique à détecter et à évaluer la décohésion dans les dalles de béton.

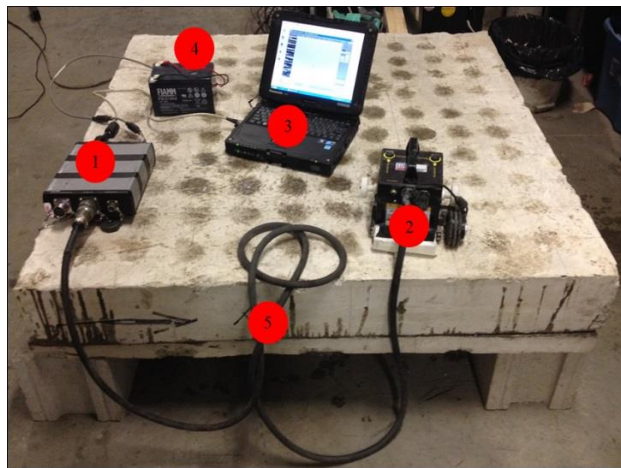


Figure 9.25 : Matériel de mesure de la technique géoradar.

## 9.4 Conclusion

Nous avons élaboré un vaste programme de conception des dalles expérimentales, dont des dalles non armées et armées. Des dalles sans défauts et avec des défauts sont de diamètre, d'épaisseur et de profondeur variables. Grâce au programme, nous pourrions ainsi ajuster les paramètres d'acquisition de données (exemple : la fréquence des ondes, le type de signaux, la distance émetteur-récepteur), déterminer la sensibilité de la méthode en fonction des défauts d'interface, évaluer la validité des hypothèses posées sur le niveau d'homogénéité du milieu de propagation, étudier la performance et la fiabilité des techniques non destructives au niveau de la détection et la quantification des défauts d'interface dans des éléments en béton représentatifs.

## CHAPITRE 10

# VALIDATION EXPÉRIMENTALE DE L'APPROCHE DÉVELOPPÉE

Ce chapitre a pour but de valider les résultats d'analyse de l'approche développée sur la base du programme numérique présenté au chapitre 8.

Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats des mesures expérimentales de la RI. Ces résultats seront ensuite comparés aux résultats numériques (analyse modale et analyse de la RI), résultats obtenus par la modélisation des dalles expérimentales fabriquées. Il s'agira ici de montrer qu'il existe une corrélation entre les courbes de mobilité expérimentales et numériques d'une part et, d'autre part, entre les différentes fréquences de résonance sur les courbes de mobilités spectrales (expérimentales et numériques) et les fréquences propres associées aux différents modes de vibration notamment les modes locaux (vibration du défaut) obtenues par l'étude modale. Ainsi, une fois la corrélation démontrée, nous appliquerons l'approche d'analyse développée de la RI dans cette thèse aux données numériques et expérimentales afin de la valider. L'approche développée sera par la suite validée et comparée à d'autres approches d'analyse ou méthodes d'auscultation utilisées dans ce programme afin de montrer la pertinence de la nouvelle approche proposée à détecter et à caractériser les paramètres d'un défaut c'est-à-dire son diamètre et sa profondeur.

Les autres approches d'analyse de la RI qui seront utilisées sont :

- L'approche conventionnelle de la RI telle que décrite par la norme **ASTM C1740 [23]** ;
- L'approche dite « arithmétique » qui consiste à calculer simplement la mobilité moyenne en un point en faisant le rapport entre la somme des mobilités associées à chacune à leur fréquence dans une gamme de fréquences donnée par le nombre total de fréquences de résonance. C'est une approche que nous avons également proposée afin de montrer sa pertinence à l'analyse des données de la RI.



Les méthodes d'auscultation qui seront également utilisées pour la validation sont :

- La thermographie infrarouge ;
- La méthode d'essai sonique ;
- La méthode de Géoradar (GPR).

Pour faire l'étude de validation, nous utiliserons les résultats issus principalement de trois dalles :

- La dalle expérimentale N° 3, dalle de référence sans défaut ;
- La dalle expérimentale N° 1, dalle caractérisée par un défaut de dimensions de 40 cm \* 40 cm \* 2 mm situé à 5 cm de profondeur ;
- La dalle expérimentale N° 4, dalle caractérisée par un défaut beaucoup plus large de dimensions de 80 cm \* 80 cm \* 0,19 mm situé à 5 cm de profondeur comparé au défaut de la dalle expérimentale N° 1.

Ces dalles ont été exposées aux mêmes conditions de fabrication, de mûrissement, de séchage, de configuration de mesure. En effet, les dalles ont été supportées par des parpaings comme sur la **Figure 10.1**. Les mesures ont été effectuées selon un maillage de 10 cm \* 10 cm. La source de vibration utilisée était un marteau muni d'un embout en PVC et le capteur utilisé, un géophone.

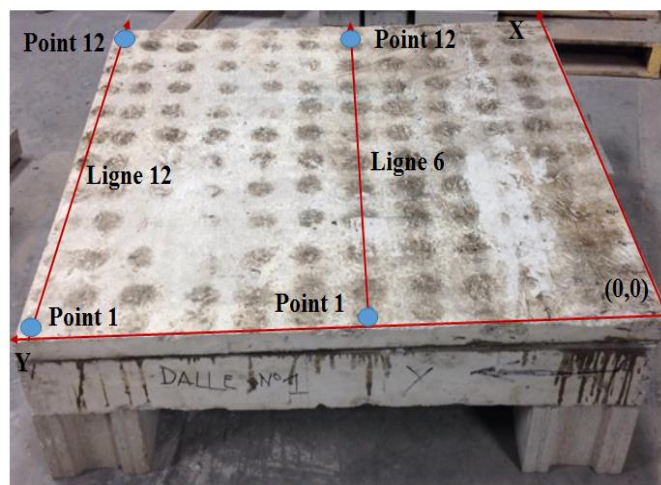


Figure 10.1 : Configuration des mesures – Dalle posée sur des parpaings – Dalle expérimentale N° 1.

Le but de l'étude en choisissant ces dalles est de montrer les possibilités ainsi que les limites de chaque méthode d'analyse en termes de détection et de caractérisation des défauts de diamètres, d'épaisseurs et profondeurs variables.

## 10.1 Validation de l'approche développée - Dalle expérimentale numéro 3

### 10.1.1 Résultats expérimentaux : Courbes de mobilité spectrale

La **Figure 10.2** représente quatre (4) courbes de mobilité spectrales issues d'une dalle saine correspondant à quatre points d'impact le long d'une ligne de mesure. Chaque courbe de mobilité spectrale représente les différents modes de déformation de la dalle associés à leurs fréquences de résonance.

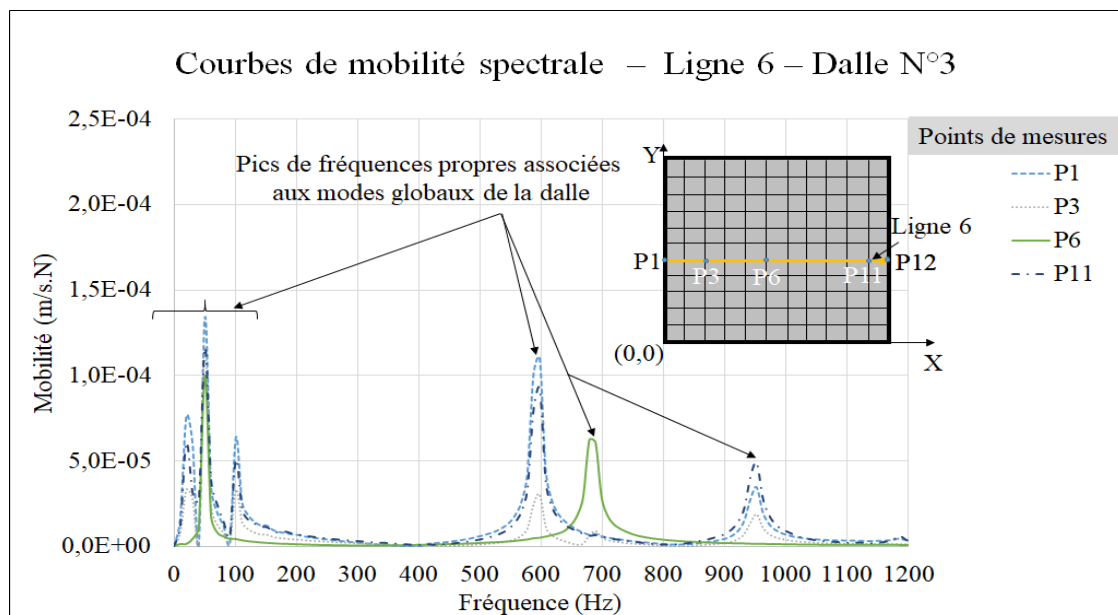


Figure 10.2 : Résultats expérimentaux – Courbes de mobilité spectrale – Dalle expérimentale N°3 – Dalle saine.

Pour une dalle saine, on note l'apparition des modes propres quasiment semblables quel que soit le point d'impact. Ces modes apparaissent aux fréquences respectives de 20, 50, 101, 597 et 952 Hz (**Figure 10.2**). Ce sont des modes propres communs à l'ensemble de la vibration de la dalle. Les amplitudes des pics de résonance de ces modes varient en fonction de la position du point d'impact dans la dalle. D'autres modes globaux peuvent apparaître, comme c'est le cas du mode



propre généré au point d'impact P6 de fréquence propre de 678 Hz qui serait associé à la vibration du centre de la dalle. La dalle saine vibre donc en mode global.

D'autres résultats des courbes de mobilité spectrale se trouvent à l'annexe B.3 (**Figure B.15**). Les résultats de l'approche expérimentale permettront de valider les résultats de l'étude numérique (analyse modale et RI).

### 10.1.2 Étude comparative - Validation du modèle numérique par l'approche expérimentale

La **Figure 10.3** représente les résultats de l'étude comparative entre l'analyse modale, les courbes de mobilité spectrale expérimentale et numérique obtenues en faisant vibrer la dalle en son centre. L'analyse modale (cartographies 3 D sur la **Figure 10.3**) montre quelques modes de vibration de la dalle. Ce sont des modes globaux. Sur les cartographies, on distingue les zones de déplacement nul en bleu et les zones de déplacement maximum en rouge. On voit donc que c'est toute la dalle entière qui vibre à différentes fréquences. Les fréquences propres associées à ces modes correspondent aux fréquences de résonance qui apparaissent sur les courbes de mobilité spectrale numérique et expérimentale.

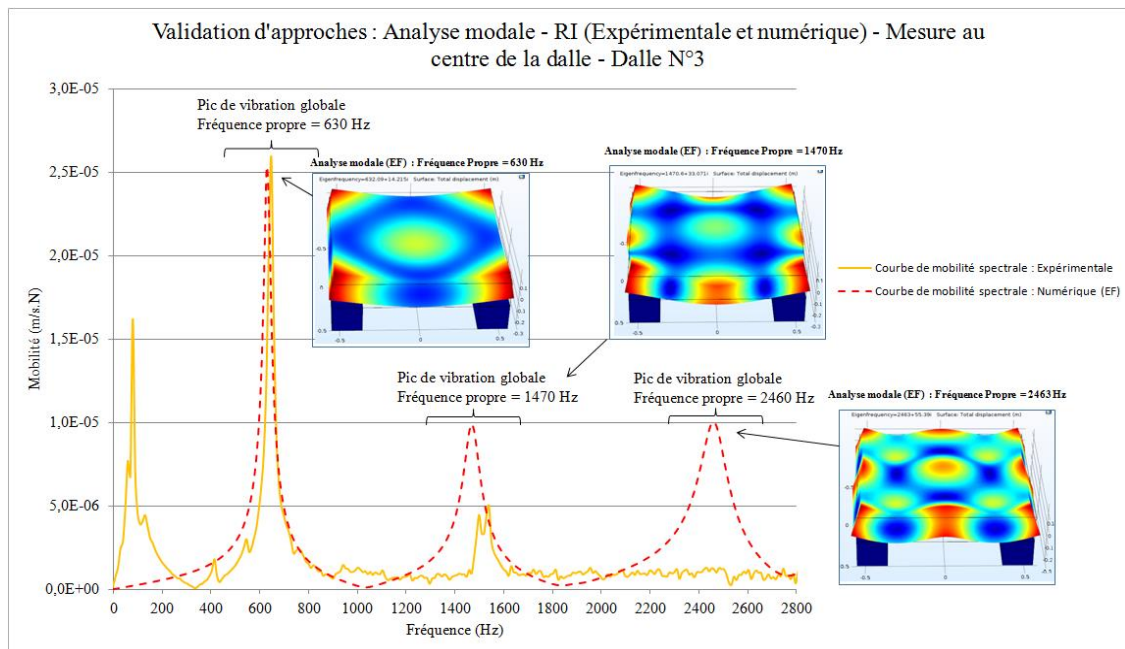


Figure 10.3 : Validation d'approches : Analyse modale – RI (expérimentale et numérique) – Mesure au centre de la dalle – Dalle expérimentale N° 3.

Les résultats numériques (analyse modale et RI) montrent une corrélation avec les résultats expérimentaux. En effet, si on considère la courbe de mobilité spectrale expérimentale, on voit qu'un mode de vibration apparaît à une fréquence de résonance égale à **630 Hz**. Ce même mode de vibration apparaît également à la même fréquence sur la courbe de mobilité spectrale numérique. D'après l'analyse modale, le mode de vibration correspondant à la fréquence de **630 Hz** est un mode de vibration globale de la dalle (les bords, le centre, etc.). D'autres modes globaux apparaissent à des fréquences respectives de **1470 Hz** et **2463 Hz**.

### **10.1.3 Validation de l'approche développée – Résultats expérimentaux et numériques**

Nous présentons quelques résultats de cartographies numériques et expérimentales obtenus en utilisant l'approche développée. Les **Figures 10.4** et **10.5** représentent les cartographies de mobilités issues des données numériques de la dalle expérimentale N° 3. Ce sont des cartographies de vibration globale de la dalle. La **Figure 10.4** représente un mode de vibration de la dalle à la fréquence de **1760 Hz**. La **Figure 10.5** représente la cartographie de vibration globale issue de la sommation de toutes les modes propres de la dalle.

Les **Figures 10.6**, **10.7** et **10.8** représentent des cartographies de mobilités de la vibration globale issue des données expérimentales de la dalle N° 3. Ce sont des cartographies de vibration globale de la dalle. On voit dans ces cartographies que la dalle expérimentale vibre aux fréquences de 90 Hz (**Figure 10.6**) et 600 Hz (**Figure 10.7**). La **Figure 10.8** représente la cartographie de vibration globale issue de la sommation de toutes les modes propres de la dalle.

Dans les deux cas d'études (numérique et expérimentale), si l'on compare les cartographies numériques et expérimentales de vibration globale (**Figures 10.5** et **10.8**), on voit que les résultats corréleront bien avec les résultats de l'analyse modale (**Figure 10.3**). On distingue dans ces cartographies les zones de vibration notamment maximum aux extrémités ou aux bords de la dalle et les zones de vibration minimum, voire nulle (mobilités nulles) au centre de la dalle. Ces cartographies décrivent bien le comportement vibratoire des dalles saines. La mobilité est toujours plus élevée aux extrémités qu'au centre de la dalle à cause de l'effet de bord.

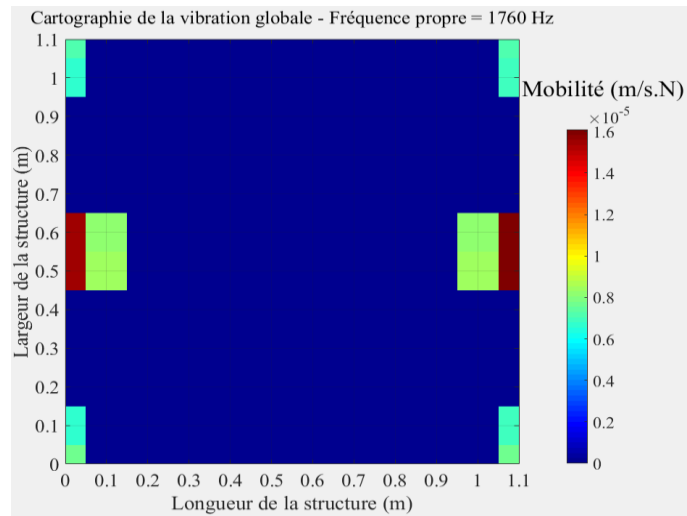


Figure 10.4 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 1760 Hz – Approche numérique.

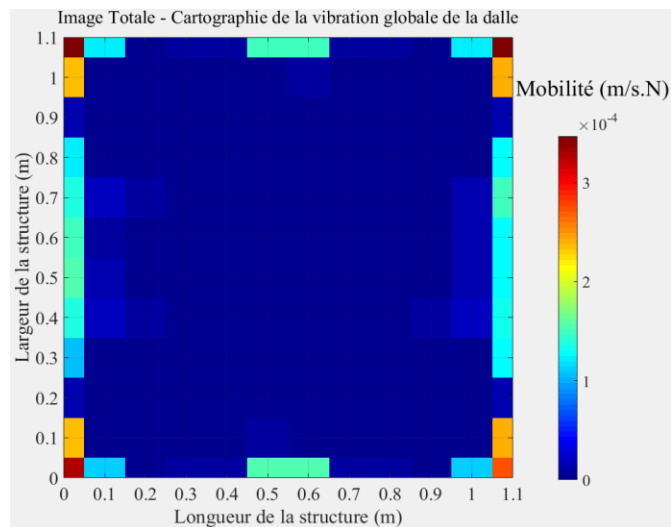


Figure 10.5 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Approche numérique.

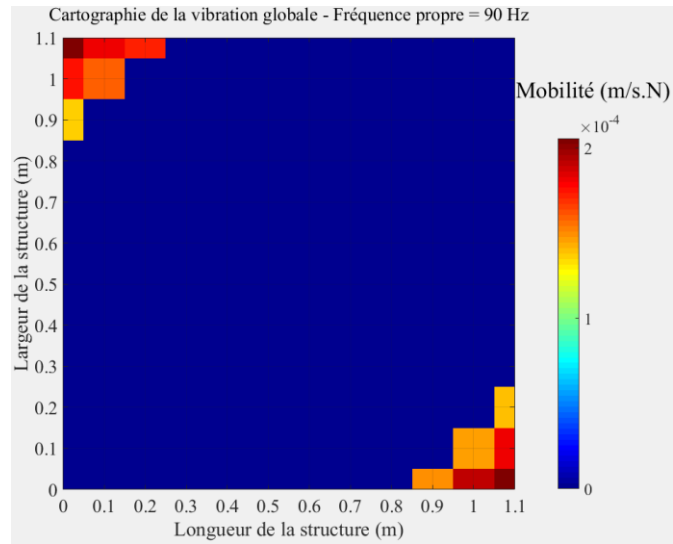


Figure 10.6 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 90 Hz – Approche expérimentale.

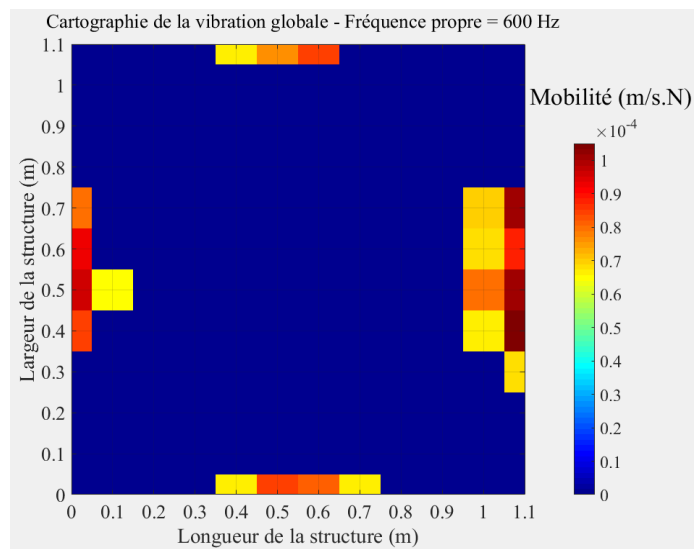


Figure 10.7 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 600 Hz – Approche expérimentale.

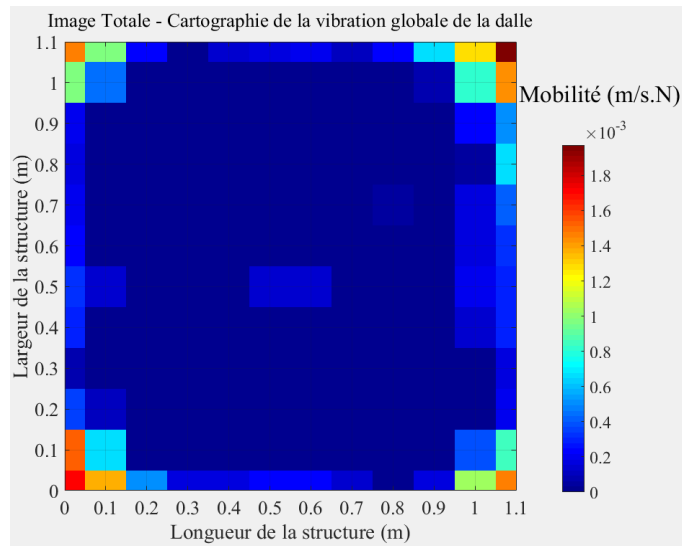


Figure 10.8 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Approche expérimentale.

#### 10.1.4 Validation de l'approche développée par les autres méthodes d'auscultation

Les résultats obtenus par autres méthodes d'auscultation montrent :

- **Approche conventionnelle de la RI :** Les résultats cartographiques numériques (Annexe B.3, Figure B.16) et expérimentaux (Annexe B.3, Figure B.17) sont comparables à ceux obtenus par l'approche développée. Dans les deux cas d'études (numérique et expérimental), les paramètres d'analyse tels que la mobilité moyenne, la pente de la mobilité, l'indice du vide sont élevés aux extrémités de la dalle et sont faibles, voire nuls au centre. La rigidité dynamique est élevée au centre de la dalle.
- **Approche arithmétique de la RI :** Les résultats cartographiques numériques (Annexe B.3, Figure B.18) et expérimentaux (Annexe B.3, Figure B.19) sont proches de ceux obtenus par l'approche développée. Dans les deux cas d'études (numérique et expérimental), la mobilité moyenne est élevée aux extrémités de la dalle et est faible, voire nulle au centre.

- **Thermographie infrarouge** : Les résultats cartographiques (**Annexe B.3, Figure B.20**) obtenus correspondent aux résultats d'une dalle saine sans défaut.
- **Géoradar (GPR)** : Les résultats cartographiques (**Annexe B.3, Figures B.21, B.22**) obtenus correspondent aux résultats d'une dalle saine sans défaut.

## 10.2 Validation de l'approche développée - Dalle expérimentale numéro 1

### 10.2.1 Résultats expérimentaux : Courbes de mobilité spectrale

Nous présentons quelques résultats expérimentaux (courbes de mobilité spectrale) issus des points d'impact le long d'une ligne de mesure passant par la zone de défaut. D'après les résultats fournis par les courbes de mobilité spectrale, on voit une nette différence en termes de mobilité entre les résultats obtenus aux points de mesure situés hors de la zone de défaut (faible mobilité observée sur les points P3 et P8) et les résultats obtenus aux points de mesure situés dans la zone de défaut (forte mobilité observée sur les points P5 et P6) autour par exemple de la fréquence de résonance de **1470 Hz (Figure 10.2)**.

Les courbes de mobilité spectrales sont constituées de plusieurs modes de déformations, les modes globaux et les modes locaux associés à la vibration du défaut dans le cas d'une dalle caractérisée par un défaut. La difficulté dans l'analyse des courbes de mobilité réside dans la distinction de ces différents modes, la distinction des pics de résonance associés à la vibration du défaut et les pics de résonance associés à la vibration globale de la dalle.

En partant de l'hypothèse que les pics de résonance associés aux défauts sont généralement caractérisés par de fortes mobilités comme c'est le cas pour points P5 et P6 de la **Figure 10.9**, on pourrait ainsi admettre que l'une des fréquences de résonance associée au mode de vibration du défaut serait donc située autour de **1470 Hz (Figure 10.9)**. Les autres fréquences de résonance seraient donc associées à la vibration d'autres modes locaux (modes, 2, 3, etc.) du défaut ou aux modes globaux de la dalle.

Pour valider que la fréquence propre de **1470 Hz** est associée à la vibration locale du défaut et surtout pour être certain que cette fréquence est associée au premier mode de vibration du défaut, nous avons réalisé une analyse numérique (analyse modale et analyse de la RI) de cette dalle par éléments finis. Il est important de savoir la fréquence propre de vibration du défaut de premier ordre, car c'est cette fréquence qui nous intéresse pour la caractérisation des paramètres du défaut (diamètre et profondeur).

D'autres résultats des courbes de mobilité spectrale se trouvent à l'annexe B.1 (**Figure B.1**). Les résultats de l'étude numérique sont présentés au paragraphe suivant.

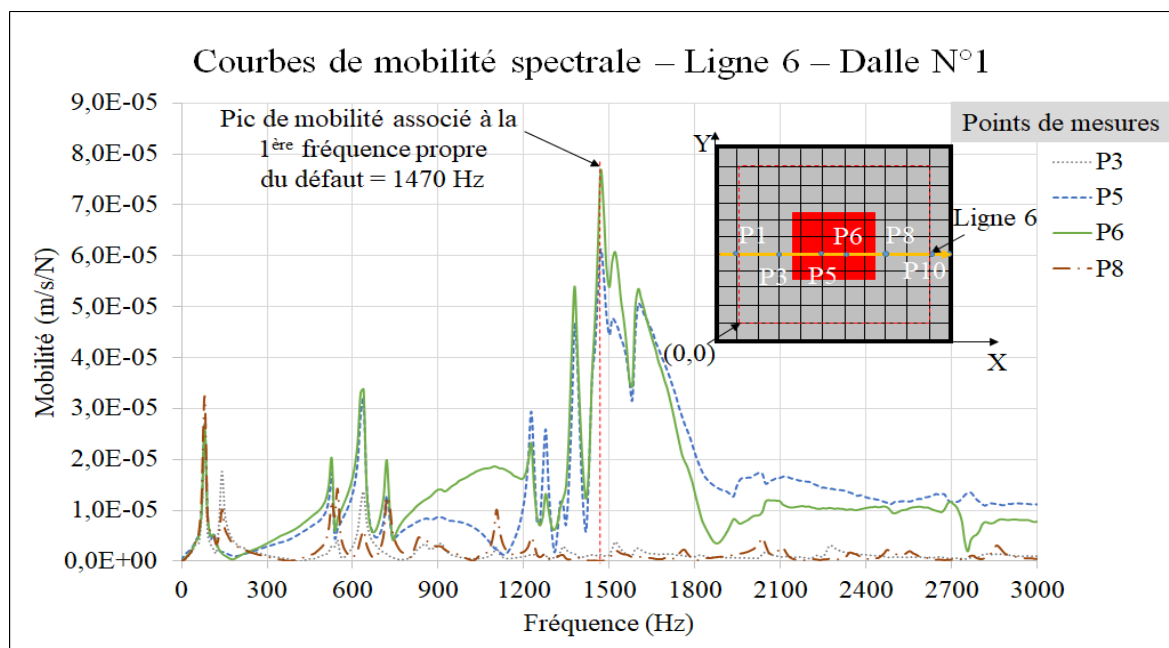


Figure 10.9 : Résultats expérimentaux – Courbes de mobilité spectrale – Dalle expérimentale N° 1.

### 10.2.2 Étude comparative - Validation du modèle numérique par l'approche expérimentale

La **Figure 10.10** représente les résultats de l'étude comparative entre l'analyse modale, les courbes de mobilité spectrale expérimentale et numérique obtenues en faisant vibrer la dalle en son centre. On voit qu'il existe une corrélation entre les différents résultats. L'analyse modale (cartographie à droite de la **Figure 10.10**) montre que seul le défaut placé au centre de la dalle vibre (vibration ou déplacement maximal représenté par la couleur en rouge) à la fréquence

propre de **1425 Hz** tandis que pour le reste de la dalle le déplacement est nul (couleur en bleu sur la cartographie de l'étude modale). Le mode de vibration associé à cette fréquence propre est le premier mode (1,1). Cette fréquence propre est proche des fréquences de résonance fournies par les courbes de mobilités spectrales expérimentale et numérique.

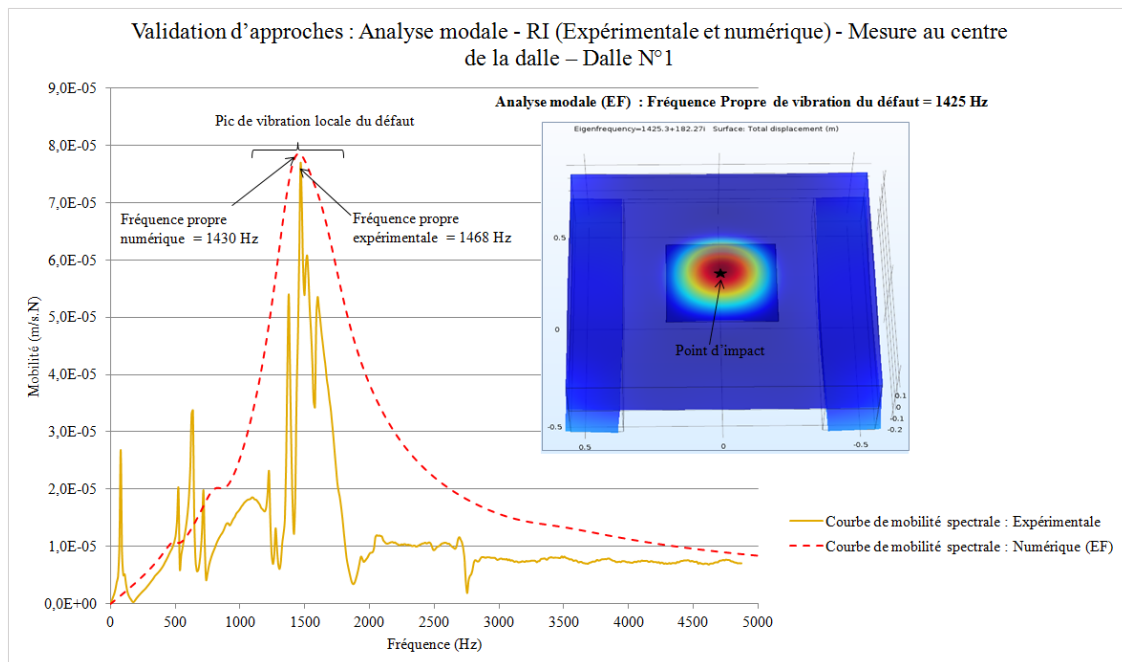


Figure 10.10 : Validation d'approches : Analyse modale – RI (Expérimentale et numérique) – Mesure au centre de la dalle – Dalle expérimentale N°1.

Les courbes de mobilité expérimentale et numérique sont corrélées de façon satisfaisante. La fréquence de résonance associée à la vibration du premier mode du défaut est de **1468 Hz** pour l'approche expérimentale et de **1430 Hz** pour l'approche numérique. Ces fréquences de vibration sont validées par l'analyse modale. L'analyse modale permet non seulement de donner des informations sur les différents modes ou formes de vibration de structures, mais aussi sur les fréquences associées à ces modes. On peut ainsi conclure qu'il existe une corrélation entre les trois approches. L'approche expérimentale a permis de valider l'approche numérique (analyse modale et l'étude de la RI). L'analyse modale a permis de confirmer le premier mode de vibration associé au défaut ainsi que sa fréquence de résonance. Connaissant ainsi cette fréquence de vibration locale, nous sommes en mesure de détecter et de caractériser les paramètres du défaut, son diamètre et sa profondeur en utilisant l'approche d'analyse développée dans cette thèse pour le traitement des données de RI.



## 10.2.3 Validation de l'approche développée – Résultats expérimentaux et numériques

### 10.2.3.1 Résultats d'analyse : Cartographies pour la détection du défaut

Nous présentons quelques résultats de cartographies numériques et expérimentales obtenus en utilisant l'approche développée. La **Figure 10.11** représente les résultats de la cartographie des mobilités de la vibration globale issue de la modélisation numérique de la dalle expérimentale N° 1 obtenus à partir de l'approche développée. On voit dans cette cartographie que c'est l'ensemble de la dalle qui vibre à savoir le défaut (au centre de la dalle), mais aussi les autres composantes notamment les bordures de la dalle. Cette cartographie permet notamment de détecter et d'évaluer le diamètre du défaut. La **Figure 10.12** représente la cartographie de mobilités de la vibration globale issue des données expérimentales de la dalle expérimentale N° 1. C'est la cartographie de vibration globale de la dalle issue de la sommation de tous les modes de vibration. Les deux cartographies de détection numérique (**Figure 10.11**) et expérimentale (**Figure 10.12**) corréleront bien. La mobilité de la dalle est plus importante dans la zone de défaut. Le défaut est bien détecté numériquement et expérimentalement en utilisant donc l'approche développée.

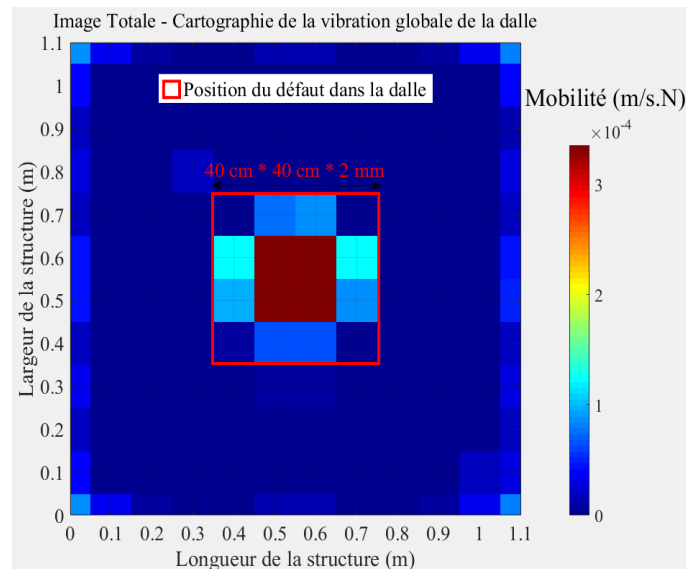


Figure 10.11 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Approche numérique.

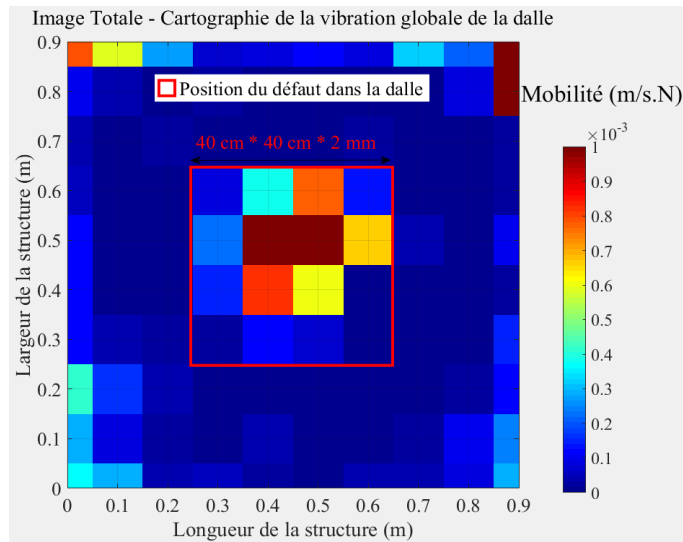


Figure 10.12 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Approche expérimentale.

### 10.2.3.2 Résultats d'analyse : Détection et évaluation de la profondeur du défaut

La **Figure 10.13** représente la cartographie de mobilités de la vibration locale du défaut obtenue par l'approche numérique. On voit dans cette cartographie que seul le défaut est en vibration. C'est donc à partir de cette cartographie connaissant la fréquence propre associée au premier mode de vibration que la profondeur du défaut est estimée. La fréquence de vibration du défaut correspondant au premier mode de vibration est de **1430 Hz**. En appliquant ainsi la formule mathématique de la vibration des plaques minces et en utilisant le diamètre du défaut estimé par l'approche développée, on obtient une profondeur du défaut estimée entre **48 mm** (profondeur minimale) et **76 mm** (profondeur maximale). La profondeur moyenne estimée est de **62 mm**. Ce qui paraît réaliste, car dans le modèle numérique, le défaut est placé à **50 mm** de profondeur.

La **Figure 10.14** représente la cartographie de mobilités de la vibration locale du défaut obtenue par l'approche expérimentale. La fréquence de vibration du défaut correspondant au premier mode de vibration est de **1470 Hz**. En appliquant la formule mathématique de la vibration des plaques minces et en utilisant le diamètre du défaut estimé par l'approche développée, on obtient une profondeur du défaut estimée entre **54 mm** (profondeur minimale) et **82 mm** (profondeur maximale). La profondeur moyenne estimée est de **68 mm**. Ce qui paraît réaliste, car le défaut a été placé à **50 mm** de profondeur.

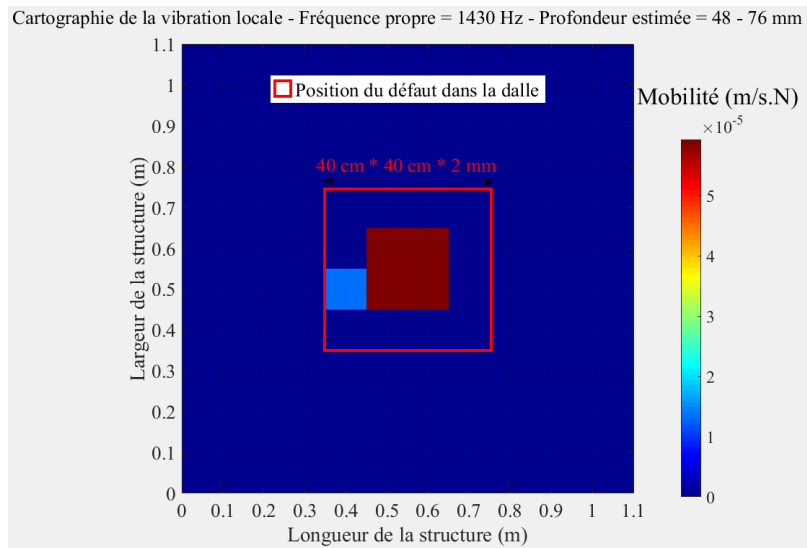


Figure 10.13 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour l’estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 1430 Hz – Approche numérique.

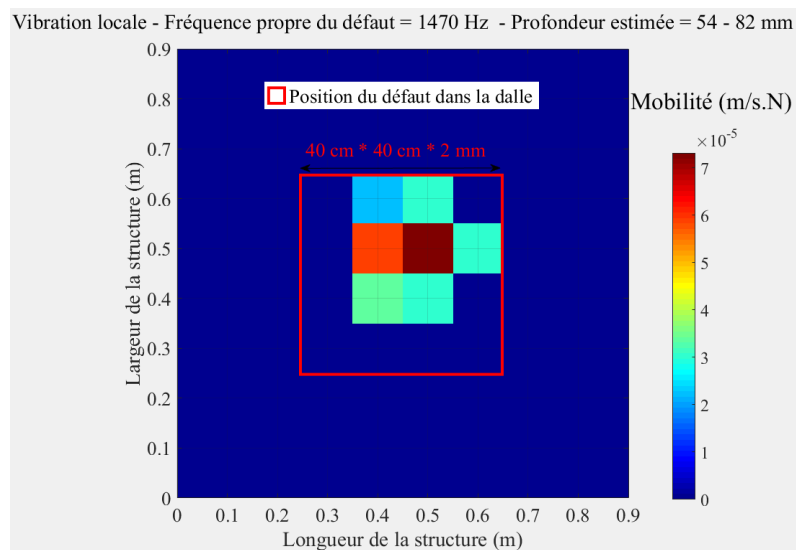


Figure 10.14 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour l’estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 1470 Hz – Approche expérimentale.

Les deux études, numérique et expérimentale montrent qu’en utilisant l’approche développée le défaut vibre à une fréquence approximative comprise entre **1430 Hz** (numérique) et **1470 Hz** (expérimentale). Ces fréquences correspondent aux fréquences de résonance obtenues à partir des courbes de mobilités spectrales numériques (**1430 Hz**) et expérimentales (**1468 Hz**) et à partir de l’analyse modale (**1425 Hz**) (Figure 10.10).

## 10.2.4 Validation de l'approche développée par les autres méthodes d'auscultation

Les résultats obtenus par autres méthodes d'auscultation montrent :

- **Approche conventionnelle de la RI** : Les résultats cartographiques numériques (**Annexe B.1, Figure B.2**) et expérimentaux (**Annexe B.1, Figure B.3**) sont proches de ceux obtenus par l'approche développée. Dans les deux cas d'études (numérique et expérimental), le défaut est détecté.
- **Approche arithmétique de la RI** : Les résultats cartographiques numériques (**Annexe B.1, Figure B.4**) et expérimentaux (**Annexe B.1, Figure B.5**) sont proches de ceux obtenus par l'approche développée. Dans les deux cas d'études (numérique et expérimental), le défaut est détecté. La mobilité moyenne est plus élevée dans la zone de défaut.
- **Thermographie infrarouge** : Les résultats cartographiques (**Annexe B.1, Figure B.6**) obtenus correspondent aux résultats d'une dalle avec un défaut. Le défaut est détecté.
- **L'essai sonique** : Les résultats cartographiques (**Annexe B.1, Figures B.7, 8**) obtenus correspondent aux résultats d'une dalle avec un défaut. Le défaut est détecté. La vitesse de propagation des ondes de compression est faible dans la zone de défaut.
- **Géoradar (GPR)** : Les résultats cartographiques (**Annexe B.1, Figures B.9, 10**) obtenus correspondent aux résultats d'une dalle avec un défaut. Le défaut est détecté.

## 10.3 Validation de l'approche développée - Dalle expérimentale numéro 4

### 10.3.1 Résultats expérimentaux : Courbes de mobilité spectrale

La **Figure 10.15** représente quelques résultats expérimentaux (courbes de mobilité spectrale) issus des points de mesure le long d'une ligne en passant par la zone de défaut. D'après les courbes de mobilités obtenues, on peut voir une nette différence de mobilité entre les points de mesure sur les zones hors de défaut (faible mobilité observée sur les points P1 et P12) et les points de mesure situés dans la zone de défaut (forte mobilité observée sur les points P6, et P7).

En observant l'allure des courbes, on pourrait suggérer que l'une des fréquences de résonance associée au mode de vibration du défaut serait donc située à une fréquence de résonance de **435 Hz (Figure 10.15)**. Les autres fréquences de résonance seraient donc associées à la vibration d'autres modes locaux (modes, 2, 3, etc.) du défaut ou aux modes globaux de la dalle. Pour avoir plus d'information sur la nature des modes et leurs fréquences propres fournis par les courbes de mobilité, une étude numérique (analyse mode et RI) de la dalle a été réalisée.

D'autres résultats des courbes de mobilité spectrale se trouvent à l'annexe B.4 (**Figure B.23**). Les résultats numériques sont présentés au paragraphe suivant.

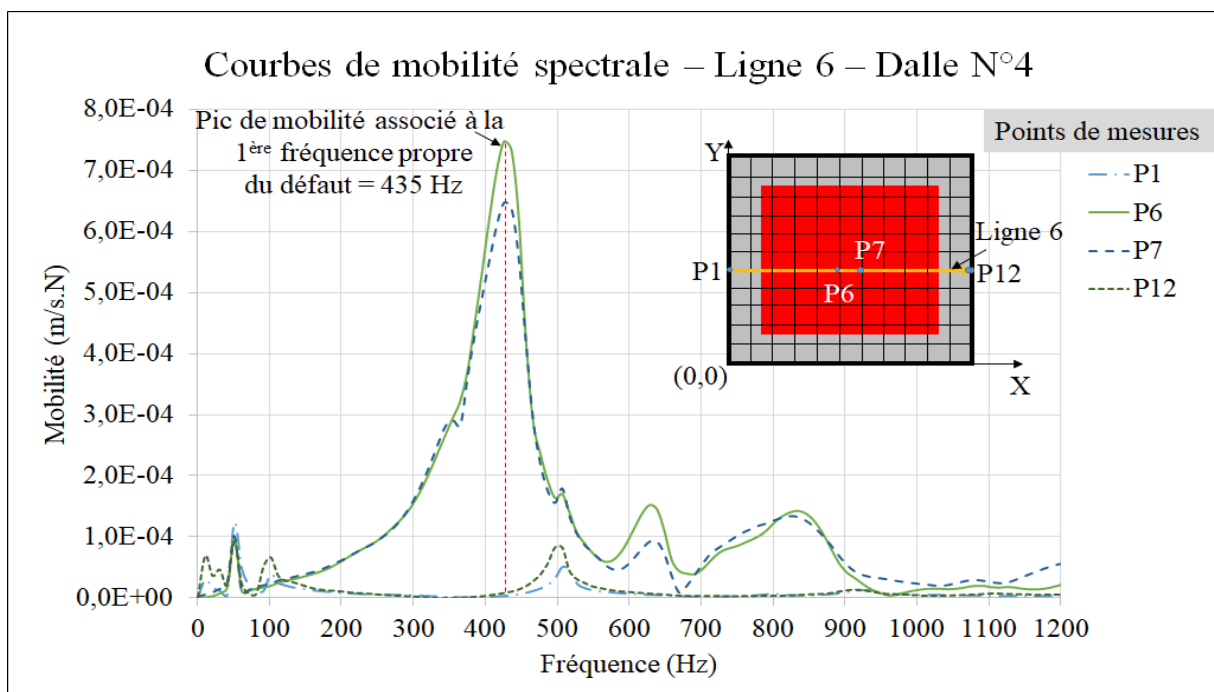


Figure 10.15 : Résultats expérimentaux – Courbes de mobilité spectrale – Dalle expérimentale N°4.

### 10.3.2 Étude comparative - Validation du modèle numérique par l'approche expérimentale

La **Figure 10.16** représente les résultats de l'étude comparative entre l'analyse modale, les courbes de mobilité spectrale expérimentale et numérique obtenues en faisant vibrer la dalle en son centre. Les courbes de mobilité expérimentale et numérique se corrélient de façon satisfaisante. On voit donc qu'il existe une corrélation entre les différents résultats. L'analyse

modale (cartographie à droite de la **Figure 10.16**) montre que seul le défaut placé au centre de la dalle vibre (vibration ou déplacement maximal représenté par la couleur en rouge) à la fréquence propre de **445 Hz** tandis que pour le reste de la dalle le déplacement est nul (surface en bleu sur la cartographie de l'étude modale). Le mode de vibration associé à cette fréquence propre est le premier mode (1,1). Cette fréquence propre est proche des fréquences de résonance fournies par les courbes de mobilités spectrales expérimentale et numérique, respectivement de **435 Hz** et **450 Hz**.

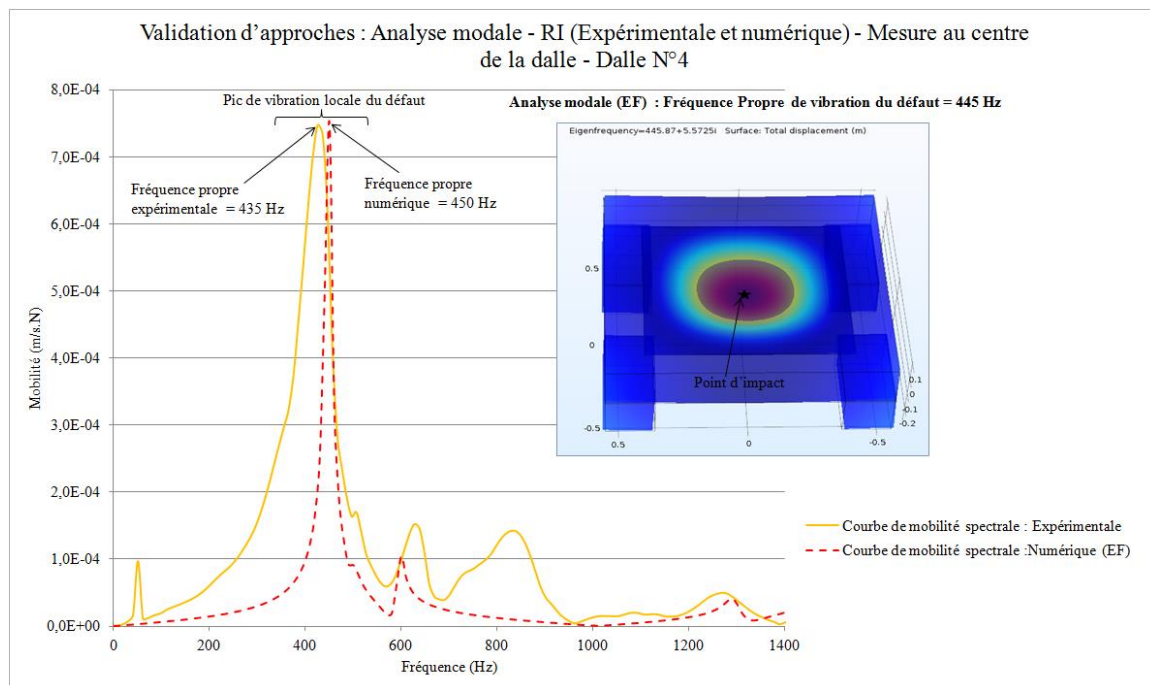


Figure 10.16 : Validation d'approches : Analyse modale – RI (Expérimentale et numérique) – Mesure au centre de la dalle – Dalle expérimentale N°4.

### 10.3.3 Validation de l'approche développée – Résultats expérimentaux et numériques

#### 10.3.3.1 Résultats d'analyse : Détection et évaluation du diamètre du défaut

La **Figure 10.17** représente la cartographie de mobilités numériques de la vibration globale issue des données numériques de la dalle expérimentale N° 4. La **Figure 10.18** représente la cartographie de mobilités expérimentales de la vibration globale issue des données expérimentales de la dalle N° 4. C'est la cartographie de vibration globale de la dalle.

Les cartographies de détection numérique et expérimentale (**Figures 10.17, 18**) obtenues à partir de l'approche développée sont proches. Le défaut est bien détecté.

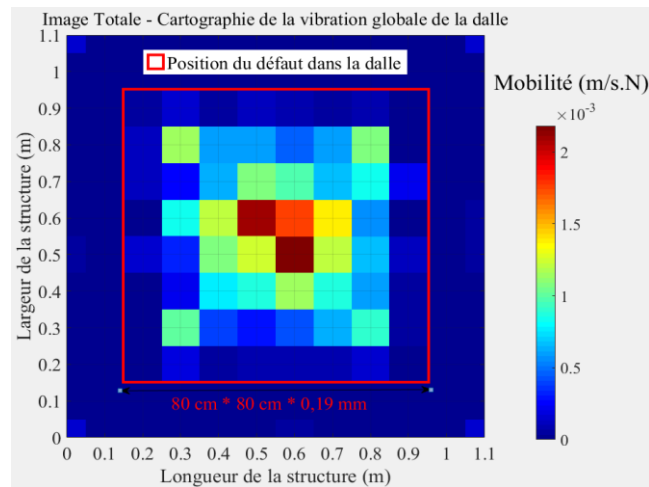


Figure 10.17 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 480 Hz – Approche numérique.

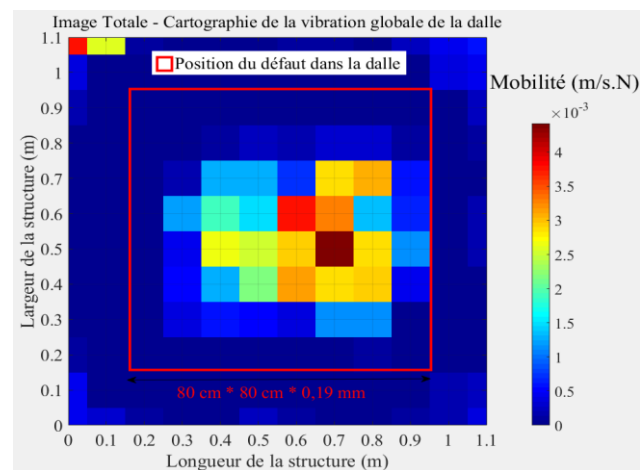


Figure 10.18 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Approche expérimentale.

### 10.3.3.2 Résultats d'analyse : Détection et évaluation la profondeur du défaut

La **Figure 10.19** représente la cartographie de mobilités numériques de la vibration locale du défaut. La fréquence de vibration du défaut correspondant au premier mode de vibration est de **450 Hz**. En appliquant ainsi la formule mathématique de la vibration des plaques minces et en utilisant le diamètre du défaut estimé par l'approche développée, on obtient une profondeur du défaut estimée entre **52 mm** (profondeur minimale) et **83 mm** (profondeur maximale). La

profondeur moyenne estimée est égale à **67,5 mm**. Ce qui paraît réaliste, car le défaut a été placé à **50 mm** de profondeur.

La **Figure 10.20** représente la cartographie de mobilités expérimentales de la vibration locale du défaut. La fréquence de vibration du défaut correspondant au premier mode de vibration est de **432 Hz**. En appliquant ainsi la formule mathématique de la vibration des plaques minces et en utilisant le diamètre du défaut estimé par l'approche développée, on obtient une profondeur du défaut estimée entre **41 mm** (profondeur minimale) et **65 mm** (profondeur maximale). La profondeur moyenne estimée est égale à **53 mm**. Ce qui paraît réaliste, car le défaut a été placé à **50 mm** de profondeur.

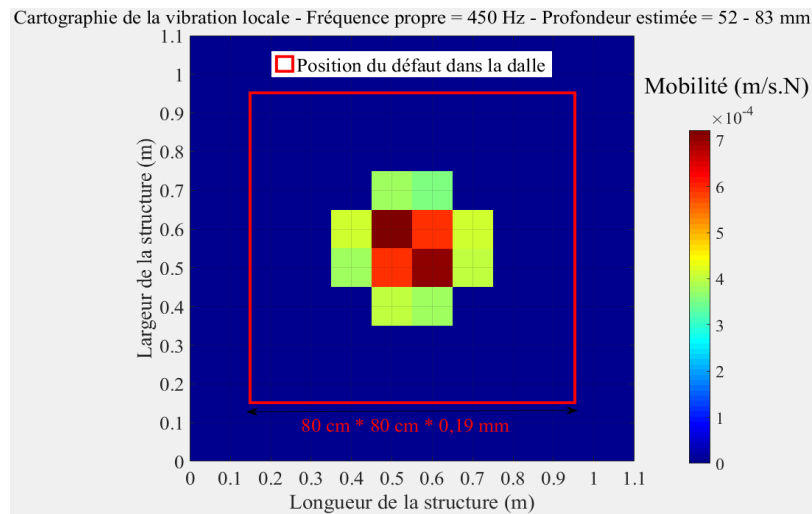


Figure 10.19 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour l'estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 450 Hz – Approche numérique.



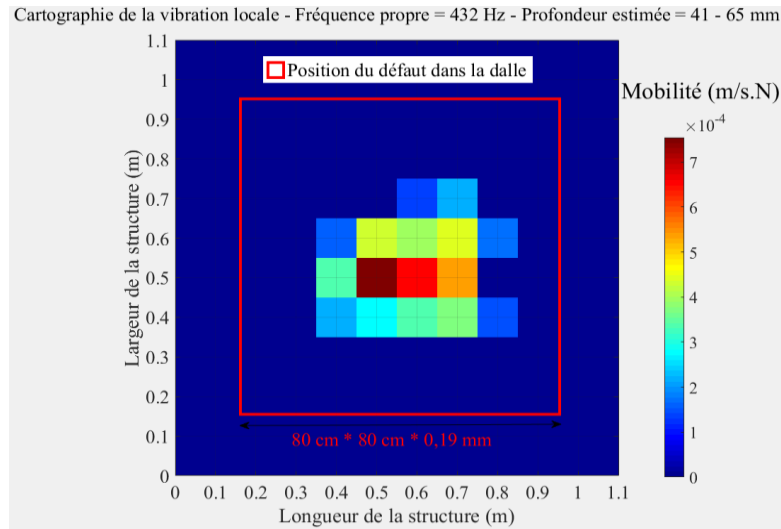


Figure 10.20 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour l’estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 432 Hz – Approche expérimentale.

### 10.3.4 Validation de l’approche développée par les autres méthodes d’auscultation

Les résultats obtenus par autres méthodes d’auscultation montrent :

- **Approche conventionnelle de la RI** : Les résultats cartographiques numériques (Annexe B.4, Figure B.24) et expérimentaux (Annexe B.4, Figure B.25) sont proches de ceux obtenus par l’approche développée. Dans les deux cas d’études (numérique et expérimental), le défaut est détecté.
- **Approche « arithmétique » de la RI** : Les résultats cartographiques numériques (Annexe B.4, Figure B.26) et expérimentaux (Annexe B.4, Figure B.27) sont proches de ceux obtenus par l’approche développée. Dans les deux cas d’études (numérique et expérimental), le défaut est détecté. La mobilité moyenne est plus élevée dans la zone de défaut.
- **Thermographie infrarouge** : Les résultats cartographiques (Annexe B.4, Figure B.28) obtenus ne permettent pas de détecter le défaut de 0,19 mm d’ouverture situé à 5 cm de profondeur de la dalle.

- **L'essai sonique** : Les résultats cartographiques (**Annexe B.4, Figures B.29, 30**) obtenus permettent de détecter le défaut. La vitesse des ondes de compression est faible dans la zone de défaut (inférieure à 2135 m/s).
- **Géoradar (GPR)** : Les résultats cartographiques (**Annexe B.4, Figures B.31, 32**) obtenus permettent de détecter partiellement le défaut.

## 10.4 Conclusion

Ce chapitre a permis de valider l'approche développée. Nous avons montré que les résultats expérimentaux et les résultats numériques concordent de façon satisfaisante. Les courbes de mobilité spectrale numérique corrélient bien avec les courbes de mobilité expérimentales. Les fréquences de résonance sur les courbes de mobilité des dalles avec défaut correspondent aux modes de vibration associés au défaut (mode local) et aux modes de vibration associés à la vibration d'autres composantes de la dalle. Ces fréquences de résonance ont été ainsi validées par l'étude modale. Les résultats obtenus par l'approche développée sont intéressants. Les résultats expérimentaux valident bien les résultats numériques. Les résultats obtenus avec d'autres méthodes d'études conduisent à des conclusions globalement cohérentes que ceux obtenus avec l'approche développée de la RI en termes de détection.

# CHAPITRE 11

## ÉTUDE PARAMÉTRIQUE EXPÉRIMENTALE DE LA PERTE DE L'ADHÉRENCE PAR L'APPROCHE DÉVELOPPÉE

Parmi les informations qui intéressent les ingénieurs lorsqu'il s'agit d'évaluer l'état de dégradation d'une structure de réparation ou d'une structure en fonction, on compte le diamètre ou l'étendue des dégradations, la profondeur et l'épaisseur de ces dégradations, la nature des dégradations (vides, fissurations, délaminages, nid-d'abeilles, etc.).

Les techniques d'auscultation sont ainsi choisies selon leurs capacités à détecter et à caractériser les défauts dans les éléments problématiques. Le chapitre précédent a montré la pertinence de l'approche d'analyse développée pour le traitement des données de la RI en termes de détection et d'estimation de la profondeur des défauts. Le chapitre 8 axé sur la validation numérique en se basant sur l'étude paramétrique détaillée a permis de montrer l'efficacité de cette approche, mais aussi ses limites.

Le but du chapitre 11 est de réaliser une autre étude paramétrique, à partir cette fois-ci des données expérimentales issues des dalles fabriquées au cours de ce programme de thèse. L'étude paramétrique permettra de confirmer ou de valider les résultats issus de l'approche numérique en présentant les capacités et ainsi que les limites de l'approche d'analyse développée. Ainsi les résultats seront ensuite comparés aux résultats issus du traitement des données de la RI en utilisant l'approche conventionnelle décrite par la norme ASTM C1740 [23] et l'approche dite « arithmétique » que nous proposons également.

Nous allons également comparer les résultats de la RI aux résultats obtenus en utilisant quelques techniques d'auscultation (principalement les techniques d'essai sonique, de GPR et de thermographie infrarouge) pour l'évaluation et la caractérisation de la perte de l'adhérence.

Ce chapitre sera donc constitué de quatre principales parties résumées dans la **Figure 11.1**, à savoir la présentation de l'étude paramétrique, les résultats de l'étude paramétrique, l'analyse des résultats de l'étude paramétrique et la conclusion

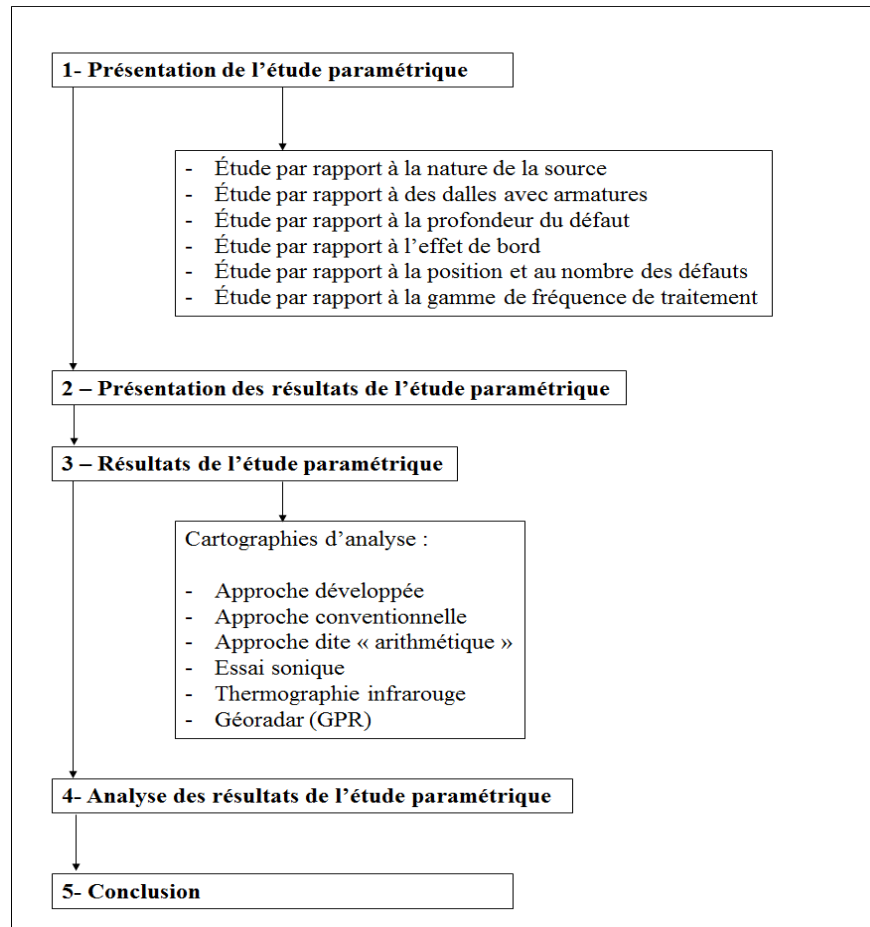


Figure 11.1 : Résumé de la structure du chapitre 11.

## 11.1 Présentation de l'étude paramétrique

Pour l'étude paramétrique, nous avons choisi quelques paramètres qui peuvent avoir un impact sur la réponse dynamique de la structure à ausculter. Ces paramètres sont :

- La nature de la source d'impact ;
- Le cas des dalles avec des barres d'armature ;
- La profondeur du défaut ;
- Les effets de bord ;

- La position et le nombre des défauts dans la dalle ;
- La gamme de fréquences de traitement.

### 11.1.1 Étude paramétrique par rapport à la nature de la source

L'étude consiste à utiliser deux sources différentes, un marteau muni d'un embout en PVC dont la gamme de fréquences d'excitation comprise entre 0 et 1200 Hz et un marteau muni d'un embout en acier inoxydable dont la gamme de fréquence d'excitation est comprise entre 0 et 4000 Hz (**Tableau 11.7**). Le but de l'étude est de montrer la capacité de chaque source à détecter et à estimer la profondeur des défauts (les défauts de petite taille de dimensions inférieures à 40 cm \* 40 cm, dont les fréquences propres de vibration sont comprises d'après l'étude modale entre 1000 et 2000 Hz). Les caractéristiques de l'étude sont consignées dans le **Tableau 11.1**. Nous avons considéré la dalle expérimentale N° 2 caractérisée par un défaut de dimensions de 40 cm \* 40 cm \* 0,28 mm situé à 5 cm de profondeur.

Tableau 11.1 : Caractéristiques des matériaux et conditions de mesures de la RI.

Dimensions du défaut	Profondeur du défaut dans la dalle	Type de capteur	Type de source	Support de la dalle
40 cm * 40 cm * 0,28 mm (Dalle N°2)	5 cm	Géophone	Marteau avec embout en :  <b>PVC</b>	Dalle sur sol
			Marteau avec embout en :  <b>ACIER INOXYDABLE</b>	

### 11.1.2 Étude paramétrique pour des dalles avec des barres d'armature

Les mesures ont été réalisées sur une dalle saine armée (Dalle expérimentale N° 7) et une dalle armée avec un défaut (Dalle expérimentale N° 8). Les caractéristiques de l'étude sont

consignées dans le **Tableau 11.2**. La dalle expérimentale N° 8 est caractérisée par un défaut de dimensions de 40 cm \* 40 cm \* 0,19 mm situé à 5 cm de profondeur.

Le but de l'étude est de montrer si l'augmentation de la rigidité d'une dalle armée affecte la réponse dynamique et quelle est la capacité de chaque méthode de traitement ou technique d'auscultation à détecter et surtout à estimer la profondeur des défauts.

Tableau 11.2 : Caractéristiques des matériaux et conditions des mesures de la RI.

Dimensions du défaut	Profondeur du défaut dans la dalle	Type de capteur	Type de source	Support de la dalle
Dalle de référence armée (Dalle N°7)	Dalle saine	Géophone	Marteau avec embout en :	Dalle sur sol
40 cm * 40 cm * 0,19 mm (Dalle N°8)	5 cm		<b>ALUMINIUM</b>	

### 11.1.3 Étude paramétrique par rapport à la profondeur du défaut

Les mesures ont été réalisées sur trois dalles avec des défauts situés à 15 cm de profondeur :

- La dalle N° 8, dalle armée caractérisée par un défaut de dimensions de 40 cm \* 40 cm \* 0,19 mm ;
- La dalle N° 6, dalle non armée caractérisée par un défaut de dimensions de 60 cm \* 60 cm \* 0,19 mm ;
- La dalle N° 4, dalle non armée caractérisée par un défaut de dimensions de 80 cm \* 80 cm \* 0,19 mm.

Les caractéristiques de l'étude sont consignées dans le **Tableau 11.3**.

Tableau 11.3 : Caractéristiques des matériaux et conditions des mesures de la RI.

Dimensions du défaut	Profondeur du défaut dans la dalle	Type de capteur	Type de source	Support de la dalle
40 cm * 40 cm * 0,19 mm (Dalle N°8)	15 cm	Géophone	Marteau avec embout en :  <b>ACIER</b>	Dalle sur sol
60 cm * 60 cm * 0,19 mm (Dalle N°6)				
80 cm * 80 cm * 0,19 mm (Dalle N°4)				

Le but de l'étude est de montrer la capacité de chaque méthode de traitement ou technique d'auscultation à détecter, mais aussi à estimer la profondeur des défauts de tailles variables situés à une profondeur de près de 15 cm qui correspond généralement à la position de la deuxième rangée des barres d'armature (barres d'armature inférieures) dans les structures minces telles que les dalles de tablier de ponts.

#### 11.1.4 Étude paramétrique par rapport à l'effet de bord

Les mesures ont été réalisées sur deux dalles avec des défauts situés à 15 cm de profondeur :

- La dalle N° 6, dalle non armée caractérisée par un de 60 cm \* 60 cm \* 0,19 mm ;
- La dalle N° 4, dalle non armée caractérisée par un de 80 cm \* 80 cm \* 0,19 mm.

Les caractéristiques de l'étude sont consignées dans le **Tableau 11.4**. Le but de l'étude est de montrer l'impact de l'effet de bord sur la capacité de chaque méthode de traitement ou technique d'auscultation à détecter mais aussi à estimer la profondeur des défauts notamment les défauts de profondeur de près de 15 cm. Cette profondeur qui correspond généralement à la position de la deuxième rangée de barres d'armature (barres d'armature inférieures) où se développent souvent les problèmes du délaminage causés par la corrosion des barres d'armature dans les structures minces telles que les dalles de tablier de ponts.

Tableau 11.4 : Caractéristiques des matériaux et conditions des mesures de la RI.

Dimensions du défaut	Profondeur du défaut dans la dalle	Type de capteur	Type de source	Support de la dalle
60 cm * 60 cm * 0,19 mm (Dalle N°6)	15 cm	Géophone	Marteau avec embout :  <b>ACIER</b>	Dalle sur sol
80 cm * 80 cm * 0,19 mm (Dalle N°4)				

### 11.1.5 Étude paramétrique par rapport à la position et au nombre des défauts

Les mesures ont été réalisées sur la dalle expérimentale N° 5 caractérisée par plusieurs défauts placés à 5 cm de profondeur (**Figure 11.2**). Les caractéristiques de l'étude sont consignées dans le **Tableau 11.5**.

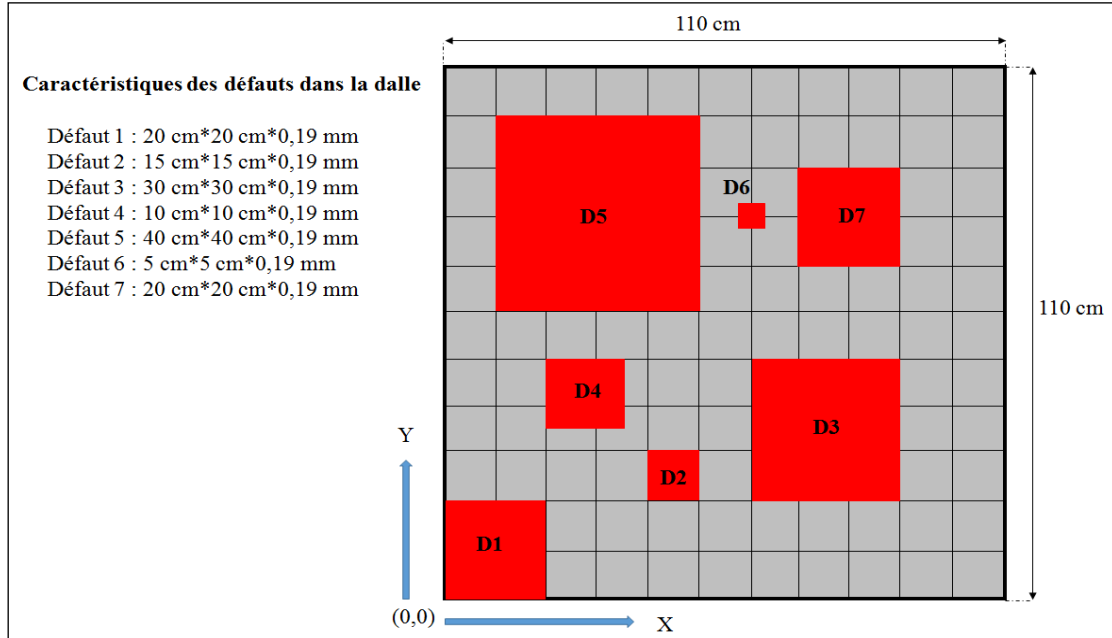


Figure 11.2 : Répartition des défauts dans la dalle – Dalle expérimentale N° 5.



Tableau 11.5 : Caractéristiques des matériaux et conditions des mesures de la RI – Dalle expérimentale N°5

Défauts	Profondeur du défaut dans la dalle	Type de capteur	Type de source	Support de la dalle
D1	5 cm	Géophone	Marteau avec embout en :  <b>ALUMINIUM</b>	Dalle sur parpaings
D2				
D3				
D4				
D5				
D6				

La dalle N°5 a été conçue dans le but de montrer la capacité de chaque méthode de traitement ou chaque technique d’auscultation à détecter, mais aussi à estimer la profondeur des défauts lorsqu’une dalle est affectée par plusieurs types de dégradation. Nous voulions également montrer que, quelle que soit la position du défaut dans le plan d’une dalle, sa fréquence propre de vibration ne varie pas. Quelques résultats des courbes de mobilité spectrale se trouvent à l’annexe (**Annexe B.5, Figures B.34, 35, 36**).

### 11.1.6 Étude paramétrique par rapport à la gamme de fréquence de traitement

Nous avons choisi deux gammes de fréquences de traitement en fonction des autres paramètres étudiés :

- **[0 – 1000 Hz]** : Gamme de fréquences compatible à la détection et à la caractérisation des défauts de diamètre supérieur ou égal à 40 cm \* 40 cm ;
- **[0 – 2000 Hz]** : Gamme de fréquences compatible à la détection et à la caractérisation des défauts de diamètre inférieur ou égal à 40 cm \* 40 cm.

## 11.2 Présentation des résultats de l'étude paramétrique

Les résultats cartographiques de l'étude paramétrique représentent des cartographies issues de :

- L'approche d'analyse développée de traitement des données de la RI. Les résultats cartographiques sont les cartographies de détection, de l'estimation du diamètre et de la profondeur des défauts ;
- L'approche conventionnelle de traitement des données de la RI ;
- L'approche dite « arithmétique » ;
- L'essai sonique ;
- La thermographie infrarouge ;
- La technique GPR. Les résultats seront présentés en 2D et en 3D.

### 11.2.1 Cartographies selon l'approche développée

- **Cartographies pour la détection.**
  - Étude paramétrique par rapport à la nature de la source :
    - **Figures 11.3, 4, 5** (cas de la source, marteau muni d'un embout en PVC) ;
    - **Figure 11.10** (cas de la source, marteau muni d'un embout en acier inoxydable).
  - Étude paramétrique pour des dalles avec des barres d'armature :
    - **Figures 11.18, 19, 20** (cas de la dalle de référence armée sans défaut) ;
    - **Figures 11.25, 26** (cas de la dalle armée avec un défaut de dimensions de 40 cm \* 40 cm \* 0,19 mm).
  - Étude paramétrique par rapport à la profondeur du défaut :
    - **Figures 11.33, 34, 35** (cas du défaut de dimensions 40 cm \* 40 cm \* 0,19 mm placé à une profondeur de 15 cm) ;
    - **Figures 11.40, 41, 42** (cas du défaut de dimensions 60 cm \* 60 cm \* 0,19 mm placé à une profondeur de 15 cm) ;

- **Figures 11.47, 48, 49** (cas du défaut de dimensions 80 cm \* 80 cm \* 0,19 mm placé à une profondeur de 15 cm).
- Étude paramétrique par rapport à l'effet de bord :
  - **Figures 11.54, 55, 56** (cas du défaut de dimensions 60 cm \* 60 cm \* 0,19 mm placé à une profondeur de 15 cm) ;
  - **Figure 11.57** (cas du défaut de dimensions 80 cm \* 80 cm \* 0,19 mm placé à une profondeur de 15 cm).
- Étude paramétrique par rapport à la position et au nombre des défauts :
  - **Figures 11.59, 60, 61, 62** (cas d'une dalle multi-défauts, exemple de la dalle N°5).
- **Cartographies pour l'estimation du diamètre et de la profondeur du défaut**
  - Étude paramétrique par rapport à la nature de la source :
    - **Figures 11.11** (cas de la source, marteau muni d'un embout en acier inoxydable).
  - Étude paramétrique par rapport à l'effet de bord :
    - **Figure 11.58** (cas du défaut de dimensions 80 cm \* 80 cm \* 0,19 mm placé à une profondeur de 15 cm).

## 11.2.2 Cartographies selon l'approche conventionnelle

- Étude paramétrique par rapport à la nature de la source :
  - **Figures 11.6, 7** (cas de la source, marteau muni d'un embout en PVC) ;
  - **Figures 11.12, 13** (cas de la source, marteau muni d'un embout en acier inoxydable).
- Étude paramétrique pour des dalles avec des barres d'armature :
  - **Figure 11.21** (cas de la dalle de référence armée sans défaut) ;
  - **Figure 11.27, 28** (cas de la dalle armée avec un défaut de dimensions de 40 cm \* 40 cm \* 0,19 mm).

- Étude paramétrique par rapport à la profondeur du défaut :
  - **Figure 11.36** (cas du défaut de dimensions 40 cm \* 40 cm \* 0,19 mm placé à une profondeur de 15 cm) ;
  - **Figures 11.43, 44** (cas du défaut de dimensions 60 cm \* 60 cm \* 0,19 mm placé à une profondeur de 15 cm) ;
  - **Figure 11.50** (cas du défaut de dimensions 80 cm \* 80 cm \* 0,19 mm placé à une profondeur de 15 cm).
- Étude paramétrique par rapport à la position et au nombre de défauts :
  - **Figures 11.63, 64** (cas d'une dalle multi-défauts, exemple de la dalle N°5).

### 11.2.3 Cartographies selon l'approche dite « arithmétique »

- Étude paramétrique par rapport à la nature de la source :
  - **Figures 11.8, 9** (cas de la source, marteau muni d'un embout en PVC) ;
  - **Figures 11.14, 15** (cas de la source, marteau muni d'un embout en acier inoxydable).
- Étude paramétrique pour des dalles avec des barres d'armature :
  - **Figure 11.22** (cas de la dalle de référence armée sans défaut) ;
  - **Figures 11.29, 30** (cas de la dalle armée avec un défaut de dimensions de 40 cm \* 40 cm \* 0,19 mm).
- Étude paramétrique par rapport à la profondeur du défaut :
  - **Figure 11.37** (cas du défaut de dimensions 40 cm \* 40 cm \* 0,19 mm placé à une profondeur de 15 cm) ;
  - **Figures 11.45, 46** (cas du défaut de dimensions 60 cm \* 60 cm \* 0,19 mm placé à une profondeur de 15 cm) ;
  - **Figure 11.51** (cas du défaut de dimensions 80 cm \* 80 cm \* 0,19 mm placé à une profondeur de 15 cm).
- Étude paramétrique par rapport à la position et au nombre des défauts :
  - **Figure 11.65** (cas d'une dalle multi-défauts, exemple de la dalle N°5).

#### 11.2.4 Cartographies selon l'essai sonique

- Étude paramétrique par rapport à la position et au nombre des défauts :
- **Figures 11.66, 67** (mesures d'essai sonique faites sur la dalle expérimentale N°5, dalle non armée avec les défauts placés à 5 cm de profondeur).

#### 11.2.5 Cartographies selon la technique Géoradar (GPR)

- Étude paramétrique par rapport à la nature de la source :
- **Figures 11.16, 17** (mesures en 2D et en 3D faites sur la dalle expérimentale N°2, dalle non armée avec le défaut placé à 5 cm de profondeur).
  
- Étude paramétrique pour des dalles avec barres d'armature :
- **Figures 11.23, 24** (mesures en 2D et en 3D faites sur la dalle expérimentale N°7, dalle armée sans défaut) ;
- **Figures 11.31, 32** (mesures en 2 D et en 3D faites sur la dalle expérimentale N°8, dalle armée avec le défaut placé à 5 cm de profondeur).
  
- Étude paramétrique par rapport à la profondeur du défaut :
- **Figures 11.38, 39** (mesures en 2D et en 3D faites sur la dalle expérimentale N°8, dalle armée avec le défaut placé à 15 cm de profondeur) ;
  
- **Figures 11.52, 53** (mesures en 2D et en 3D faites sur la dalle expérimentale N°4, dalle non armée avec le défaut placé à 15 cm de profondeur).
  
- Étude paramétrique par rapport à la position et au nombre des défauts :
- **Figures 11.68, 69** (mesures en 2 D et en 3D faites sur la dalle expérimentale N°5, dalle non armée avec les défauts placés à 5 cm de profondeur).

## 11.3 Résultats de l'étude paramétrique

### 11.3.1 Étude par rapport à la nature de la source

#### 11.3.1.1 Source : Marteau muni d'un embout en PVC - Dalle expérimentale N°2

➤ Résultats expérimentaux (RI) – Approche développée

- Résultats d'analyse : Cartographies pour la détection

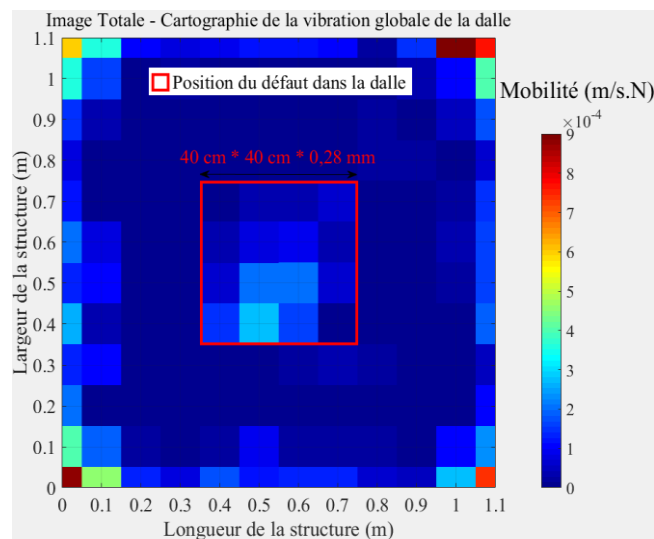


Figure 11.3 : Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection  
Cartographie de la vibration globale de la dalle.

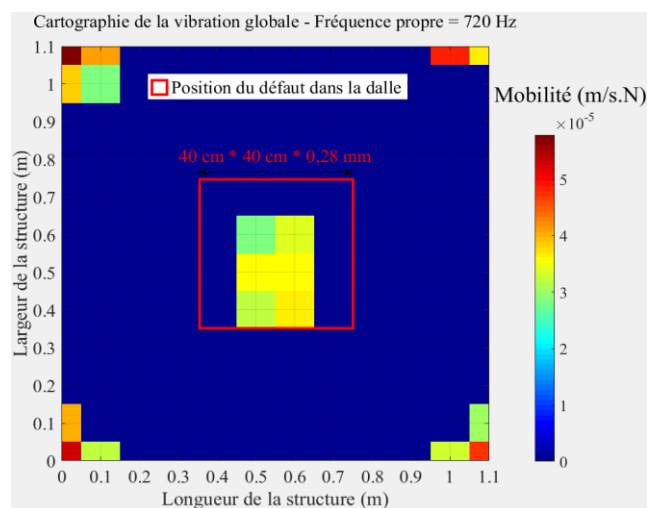


Figure 11.4 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre  
de vibration de 720 Hz.

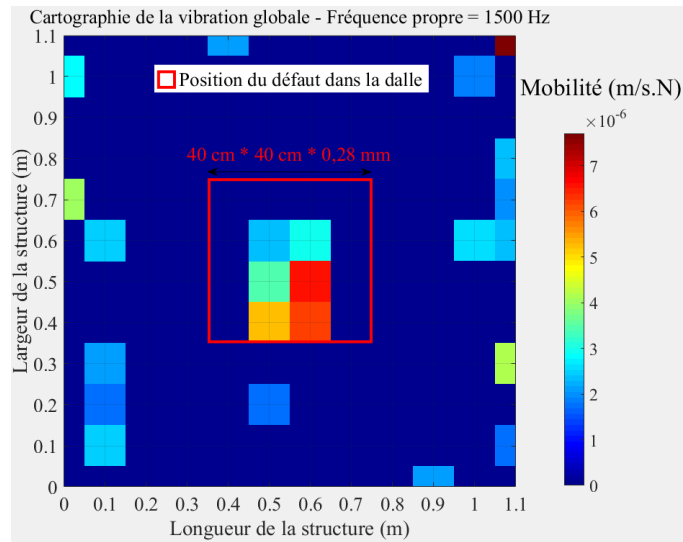


Figure 11.5 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 1500 Hz.

➤ **Résultats expérimentaux (RI) : Approche conventionnelle**

- **Gamme de fréquences d'analyse : [0 – 1000 Hz]**

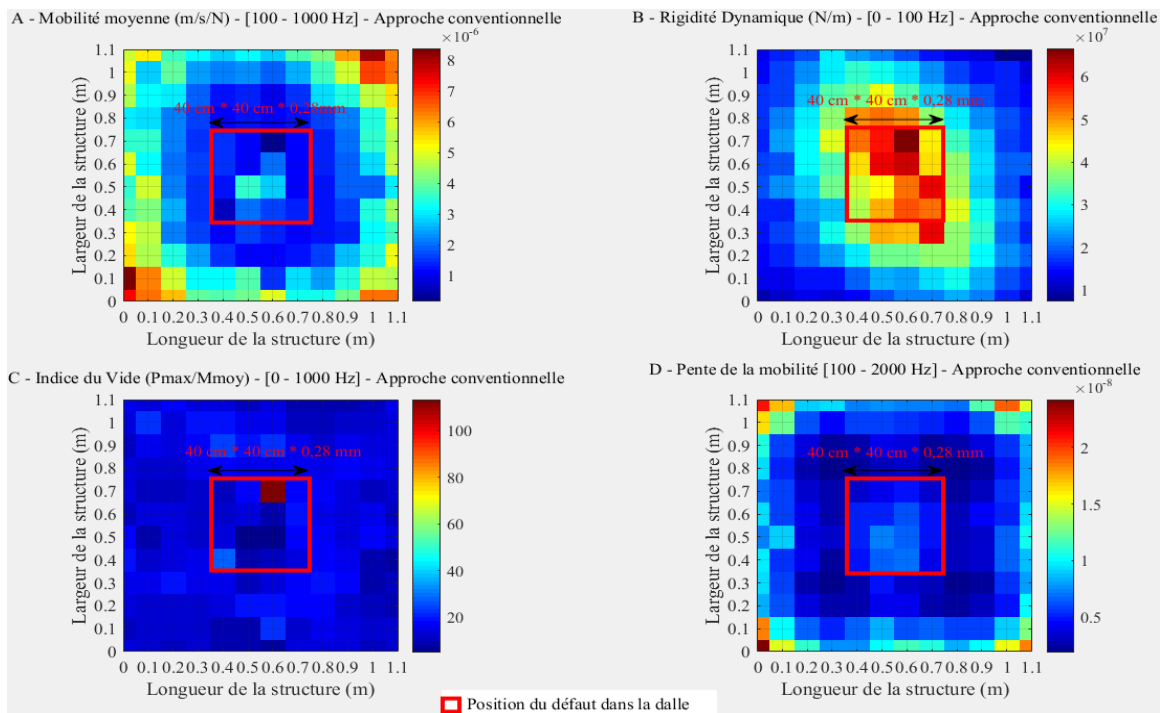


Figure 11.6 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes – B : Rigidité dynamique – C : Indice du vide – D : Pente de la mobilité.

- **Gamme de fréquences d'analyse : [0 – 2000 Hz]**

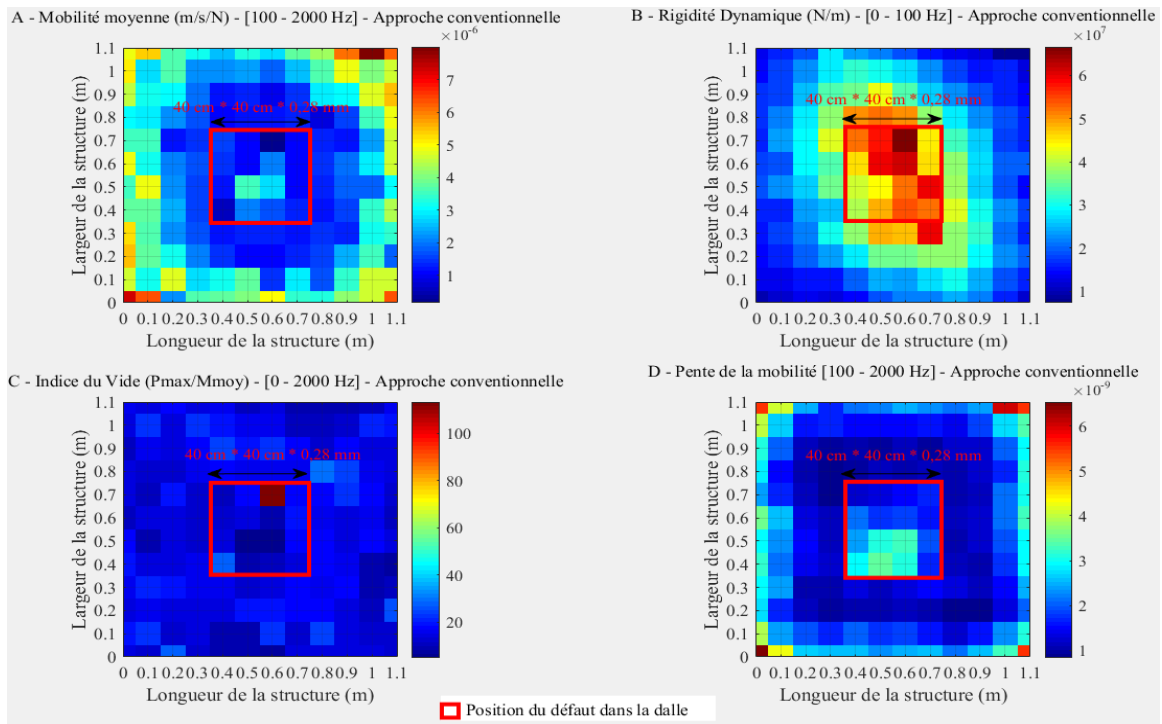


Figure 11.7 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes – B : Rigidité dynamique – C : Indice du vide – D : Pente de la mobilité.

➤ **Résultats expérimentaux (RI) : Approche « arithmétique »**

- **Gamme de fréquences d'analyse : [0 – 1000 Hz]**

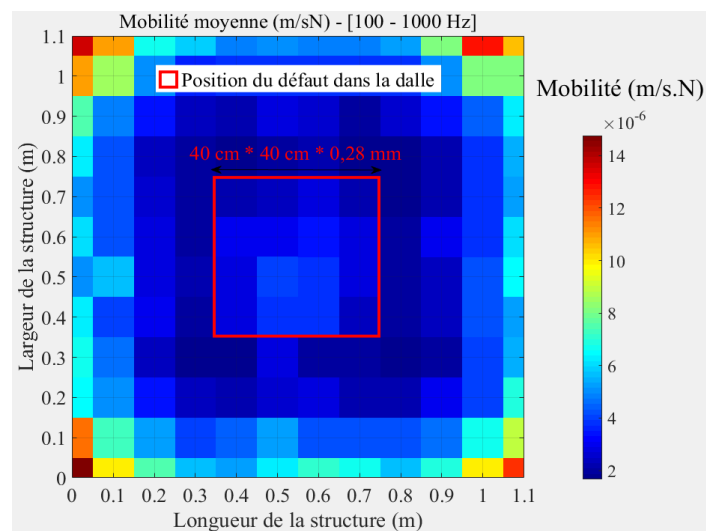


Figure 11.8 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes.



- **Gamme de fréquences d'analyse : [0 – 2000 Hz]**

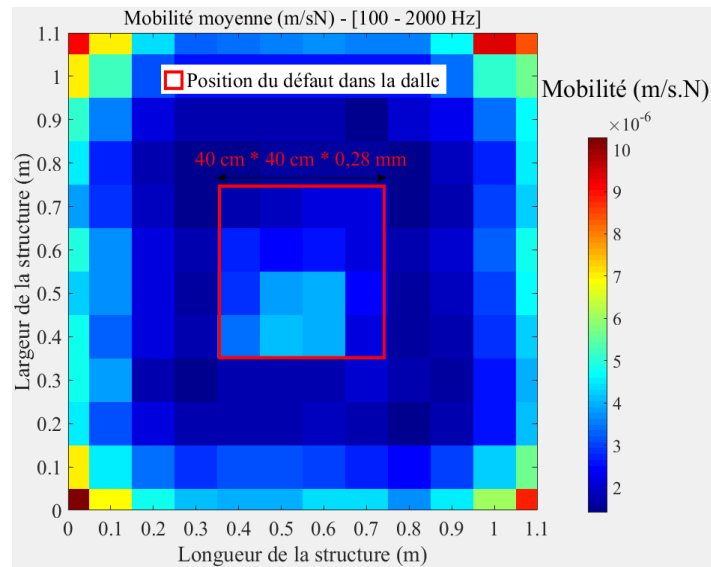


Figure 11.9 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes.

### 11.3.1.2 Source : Marteau muni d'un embout en acier inoxydable - Dalle expérimentale N°2

#### ➤ Résultats expérimentaux (RI) - Approche développée

- **Résultats d'analyse : Détection et évaluation du diamètre du défaut**

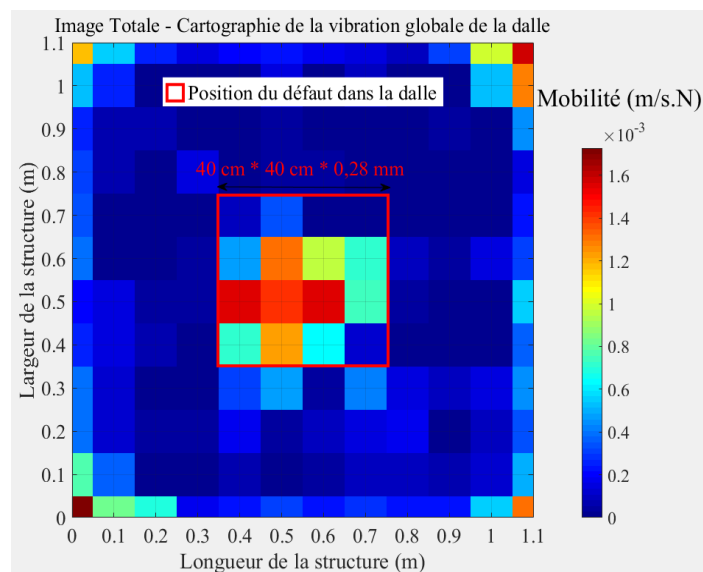


Figure 11.10 : Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection  
Cartographie de la vibration globale de la dalle.

- **Cartographie pour l'estimation de la taille et de la profondeur du défaut**

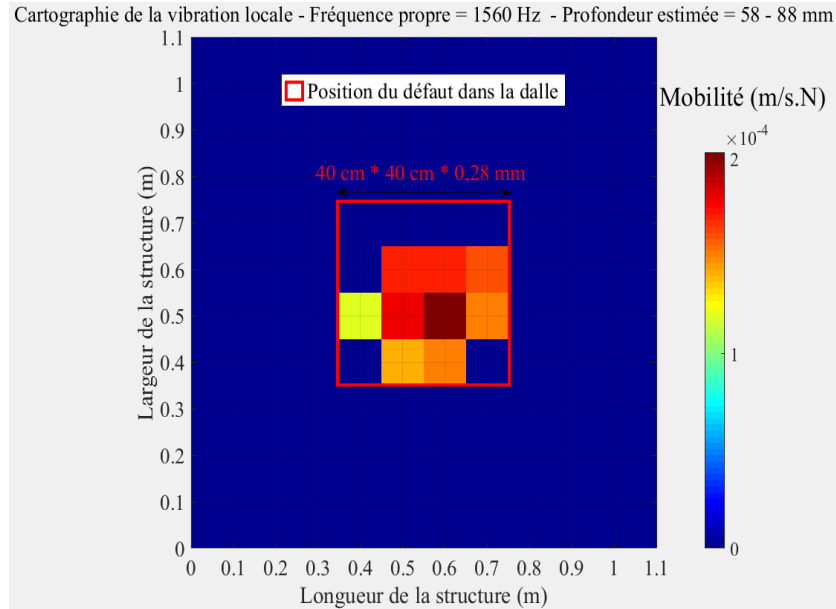


Figure 11.11 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour l'estimation de la taille et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 1560 Hz.

➤ **Résultats : Approche conventionnelle**

- **Gamme de fréquences d'analyse : [0 – 1000 Hz]**

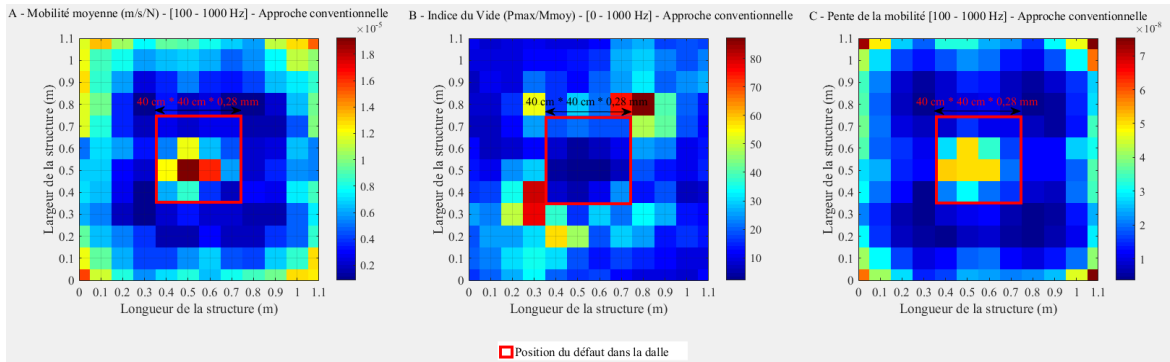


Figure 11.12 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes – B : Indice du vide – C : Pente de la mobilité.

- Gamme de fréquences d'analyse : [0 – 2000 Hz]

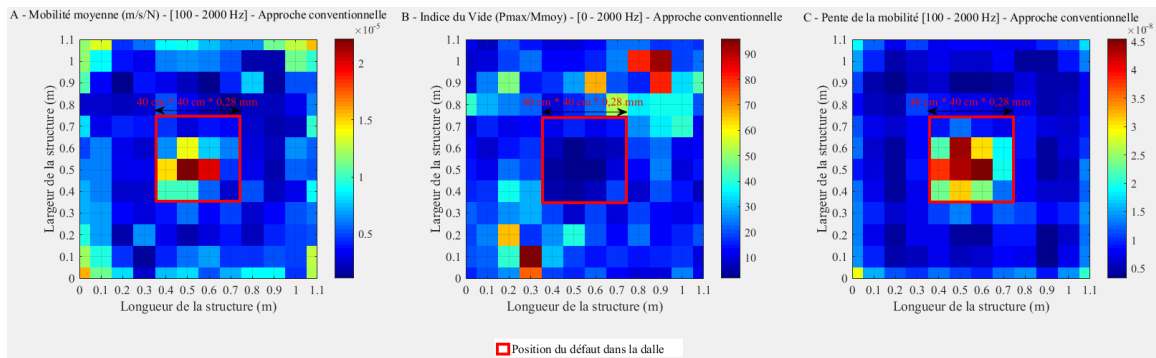


Figure 11.13 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes – B : Indice du vide – C : Pente de la mobilité.

### ➤ Résultats : Approche « arithmétique » – Mobilité moyenne

- Gamme de fréquences d'analyse : [0 – 1000 Hz]

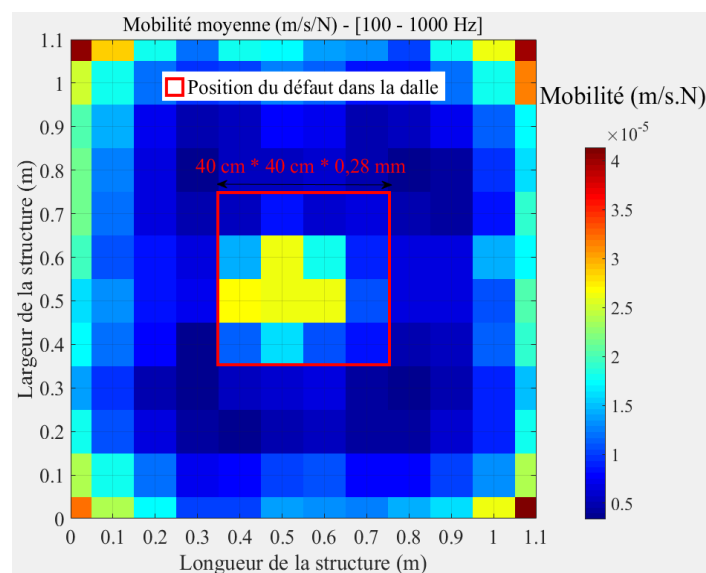


Figure 11.14 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes.

- Gamme de fréquences d'analyse : [0 – 2000 Hz]

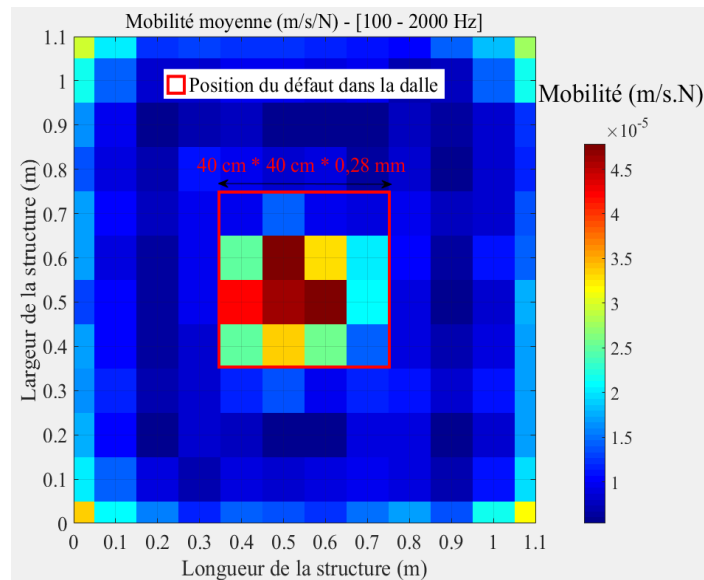


Figure 11.15 : Approche « arithmétique » - Mobilité moyenne.

### ➤ Résultats et analyse à partir de la méthode GPR

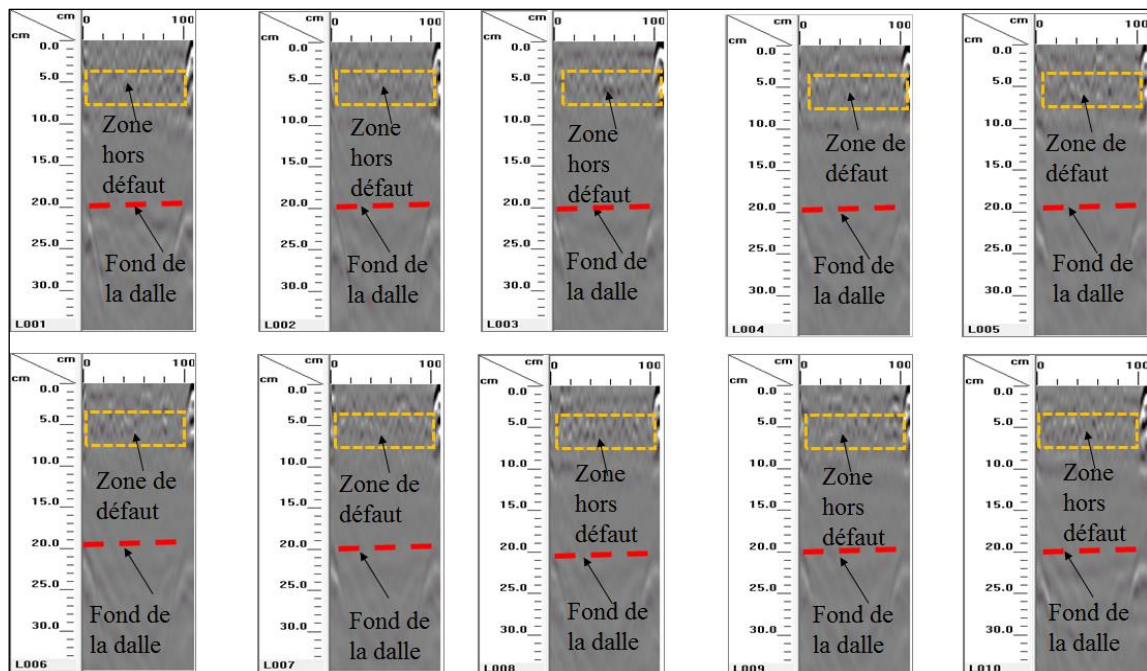


Figure 11.16 : Détection de la qualité de l'adhérence par Géoradar (GPR) – Imagerie 2D  
Défaut placé à 5 cm de profondeur de la dalle – Dalle N° 2.

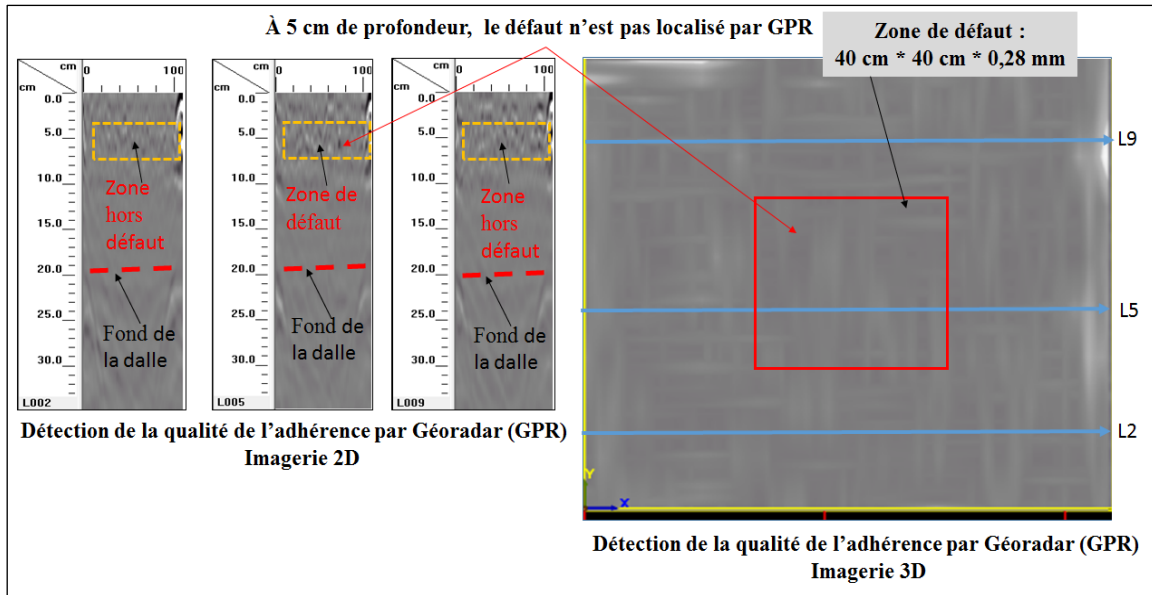


Figure 11.17 : Détection de la qualité de l'adhérence par Géoradar (GPR) – Défaut placé à 5 cm de profondeur de la dalle - Dalle N° 2.

### 11.3.2 Étude paramétrique : Dalles avec des barres d'armature

#### 11.3.2.1 Dalle de référence armée sans défaut - Dalle expérimentale N°7

##### ➤ Résultats expérimentaux (RI) - Approche développée

- Résultats d'analyse : Dalle saine armée - Dalle expérimentale N°7

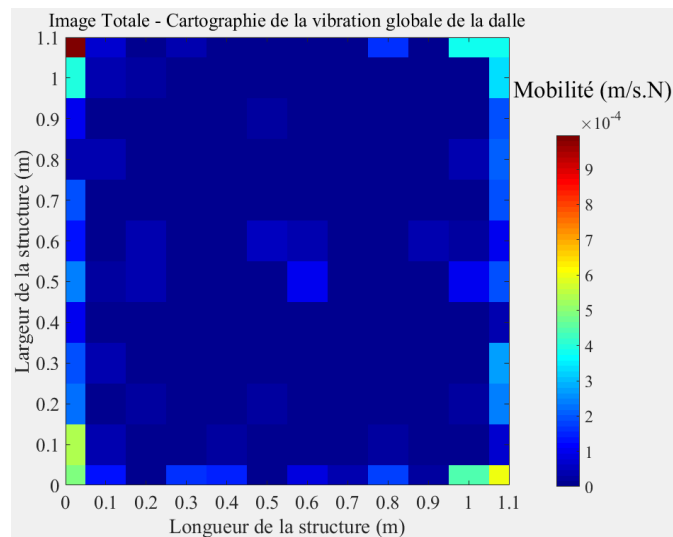


Figure 11.18 : Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection  
Cartographie de la vibration globale de la dalle.

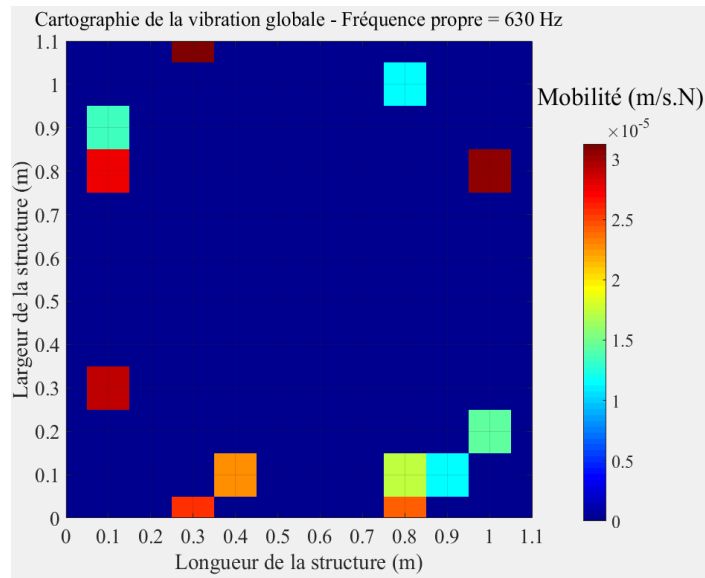


Figure 11.19 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 630 Hz.

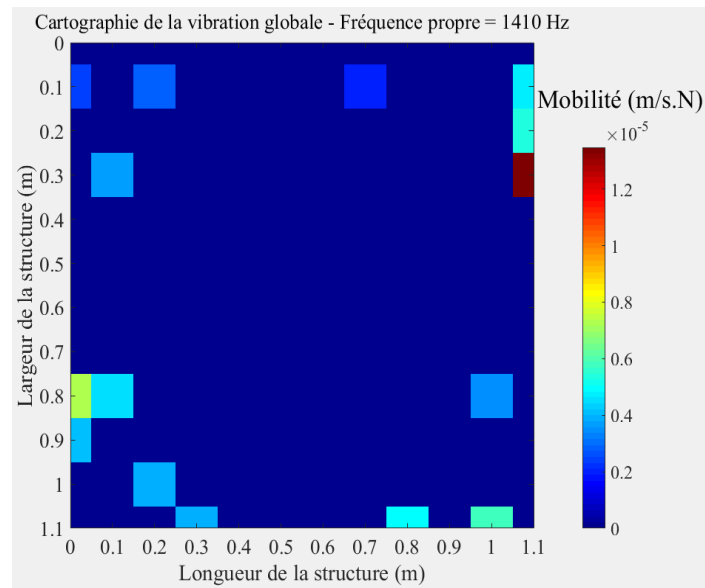


Figure 11.20 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 1410 Hz.

➤ **Résultats expérimentaux (RI) - Approche conventionnelle (RI)**

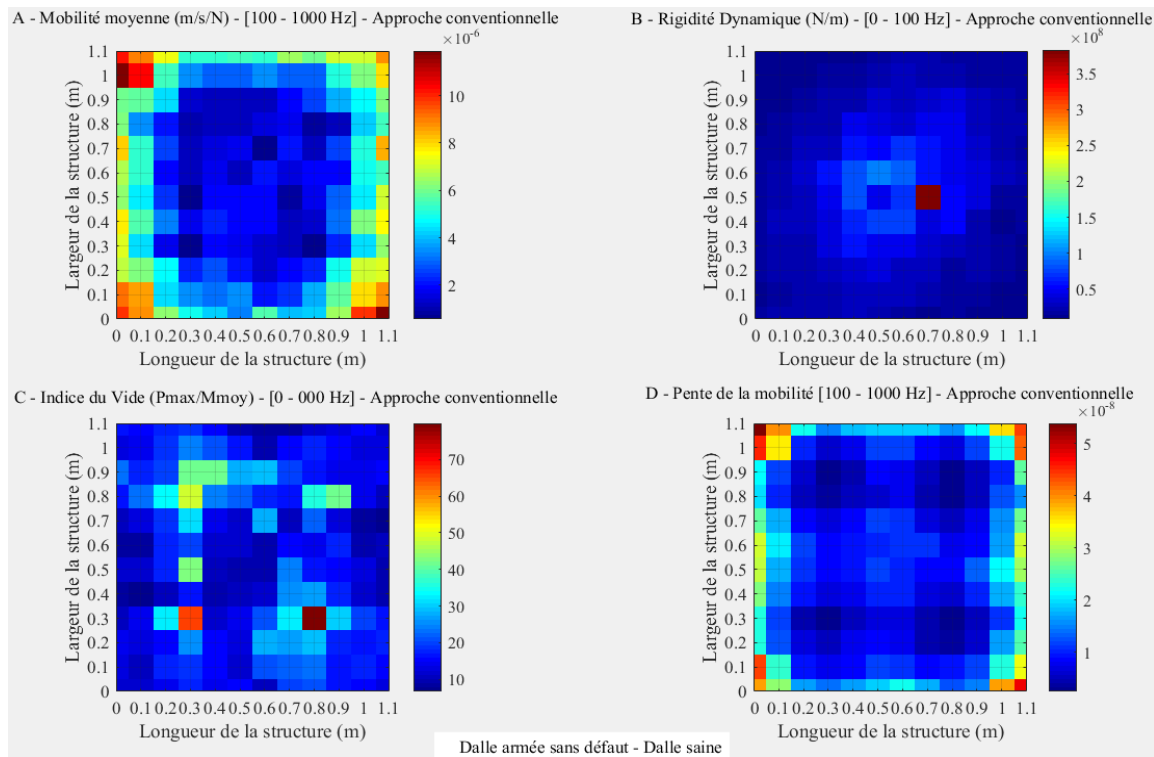


Figure 11.21 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes – B : Rigidité dynamique – C : Indice du vide – D : Pente de la mobilité.

➤ **Résultats expérimentaux (RI) - Approche « arithmétique »**

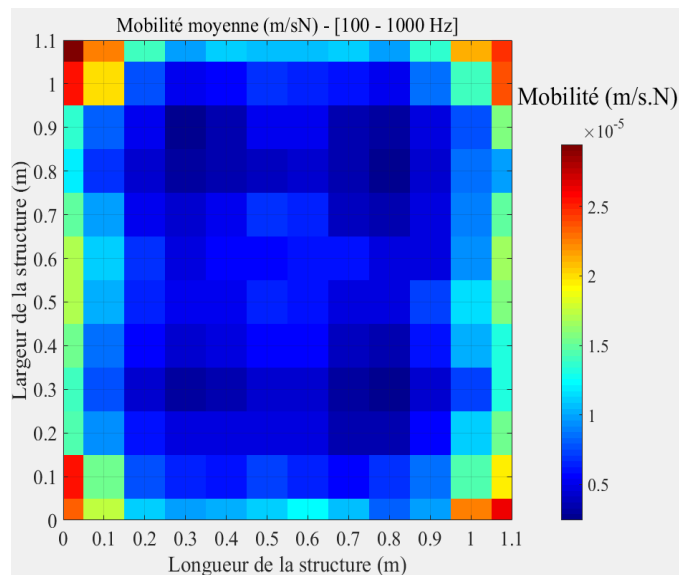


Figure 11.22 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes.

➤ Résultats et analyse à partir de la méthode GPR

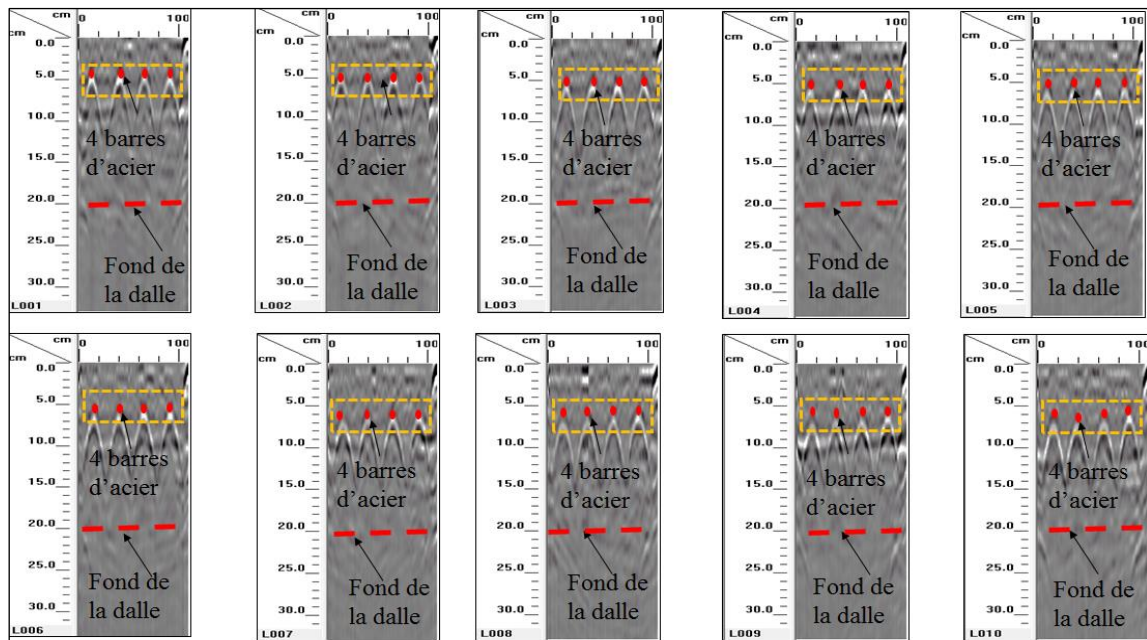


Figure 11.23 : Détection de la qualité de l'adhérence par Géoradar (GPR) – Imagerie 2D  
Dalle sans défaut des barres d'armature placées à 5 cm de profondeur – Dalle N° 7.

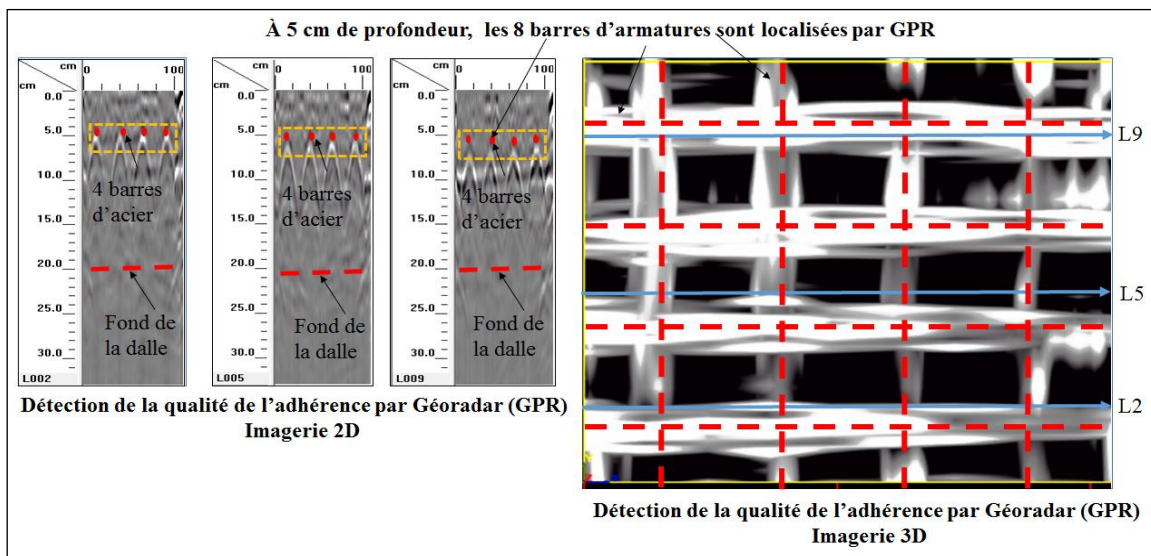


Figure 11.24 : Détection de la qualité de l'adhérence par Géoradar (GPR) – Imagerie 3D  
Dalle sans défaut avec huit barres d'armature horizontales dans les deux directions orthogonales placées à 5 cm de profondeur – Dalle N° 7.



### 11.3.2.2 Dalle armée avec un défaut : Dalle expérimentale N°8

#### ➤ Résultats expérimentaux (RI) - Approche développée

- Résultats d'analyse : Détection et évaluation de la taille du défaut

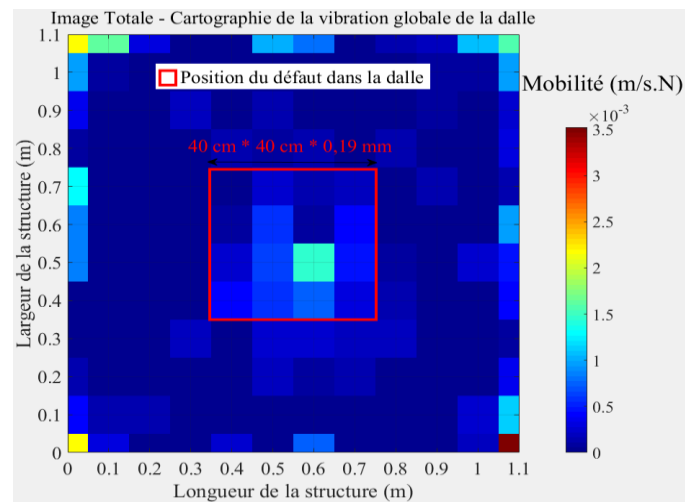


Figure 11.25 : Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection  
Cartographie de la vibration globale de la dalle.

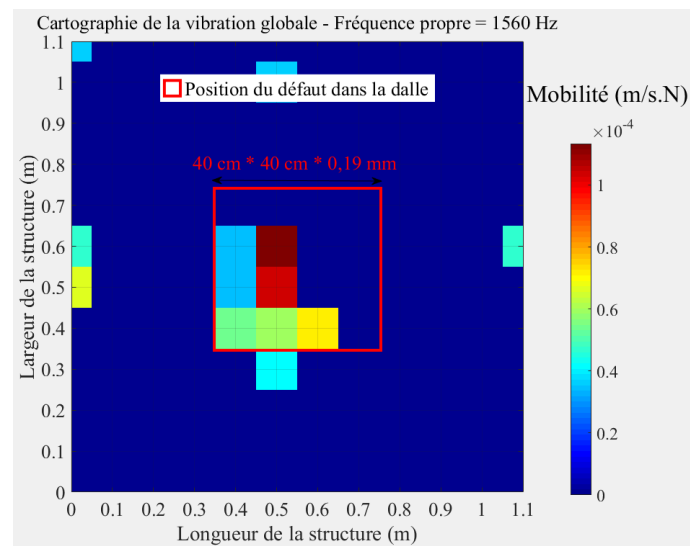


Figure 11.26 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 1560 Hz.

## ➤ Résultats : Approche conventionnelle

- Gamme de fréquences d'analyse : [0 – 1000 Hz]

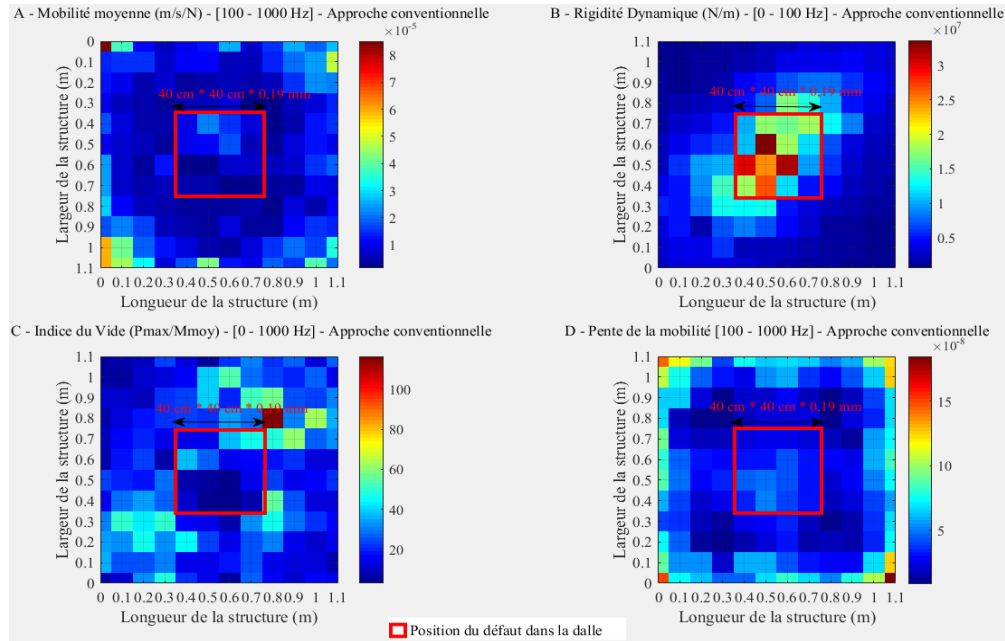


Figure 11.27 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes – B : Rigidité dynamique – C : Indice du vide – D : Pente de la mobilité.

- Gamme de fréquences d'analyse : [0 – 2000 Hz]

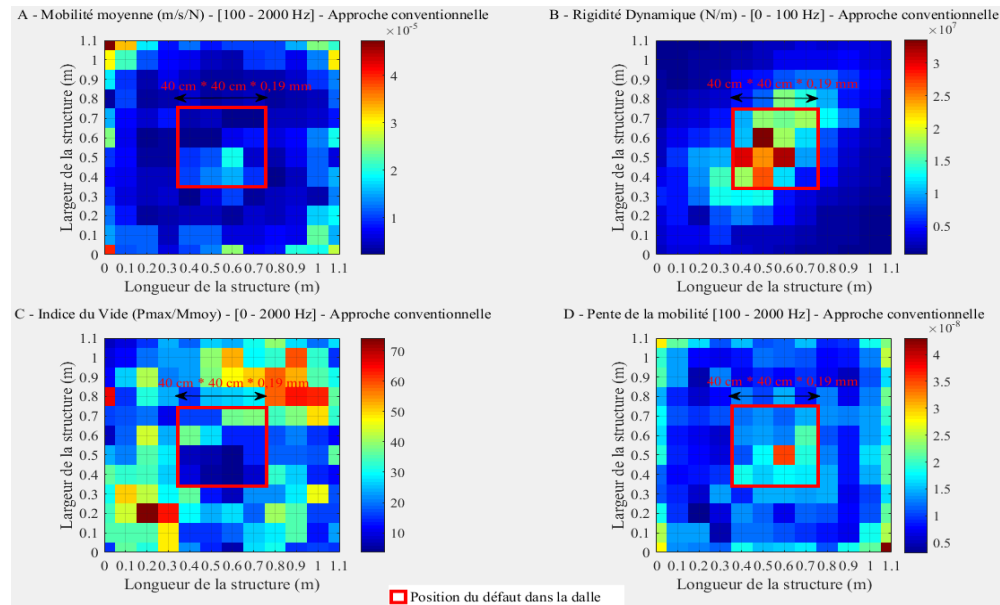


Figure 11.28 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes - B : Rigidité dynamique – C : Indice du vide – D : Pente de la mobilité.

➤ **Résultats : Approche « arithmétique » – Mobilité moyenne**

- **Gamme de fréquences d'analyse : [0 – 1000 Hz]**

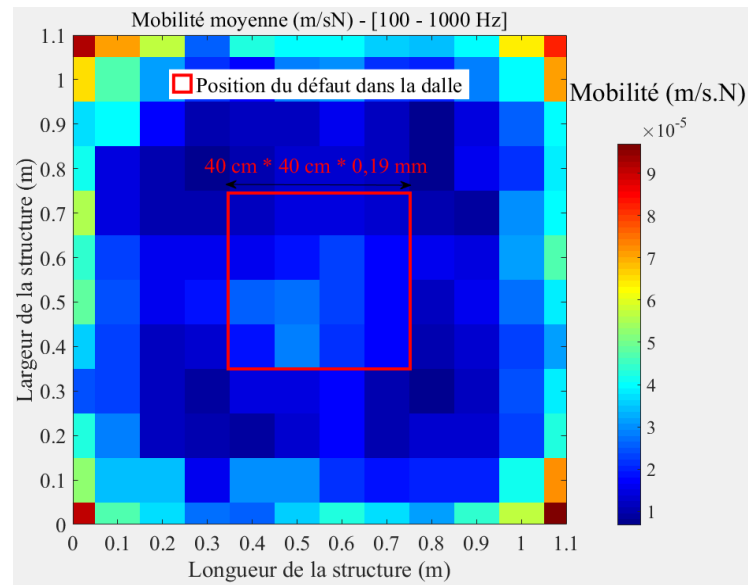


Figure 11.29: Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes.

- **Gamme de fréquences d'analyse : [0 – 2000 Hz]**

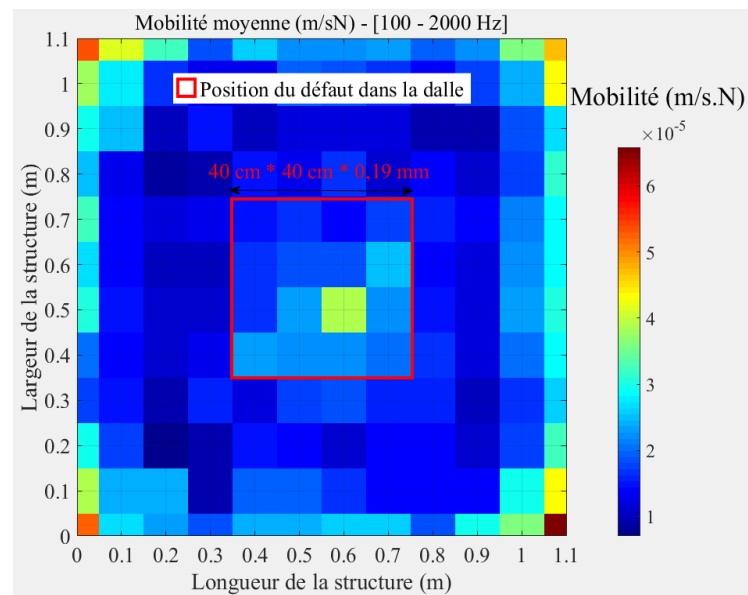


Figure 11.30 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes.

## ➤ Résultats et analyse à partir de la méthode GPR

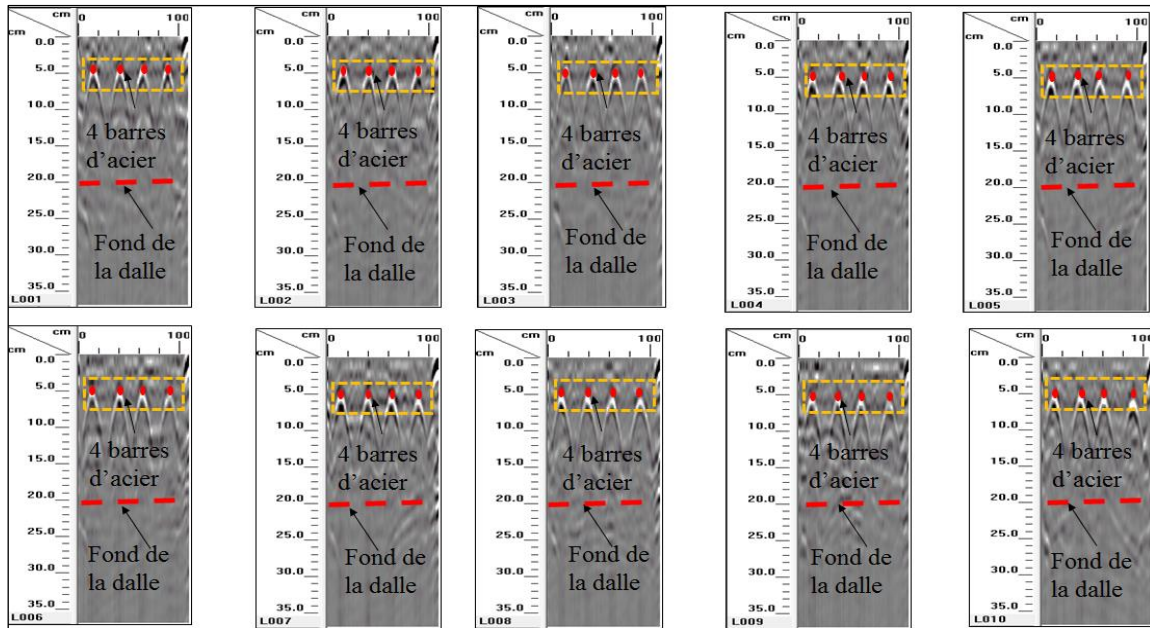


Figure 11.31 : Détection de la qualité de l'adhérence par Géoradar (GPR) – Imagerie 2D  
Dalle avec un défaut des barres d'armature placées à 5 cm de profondeur – Dalle N° 8.

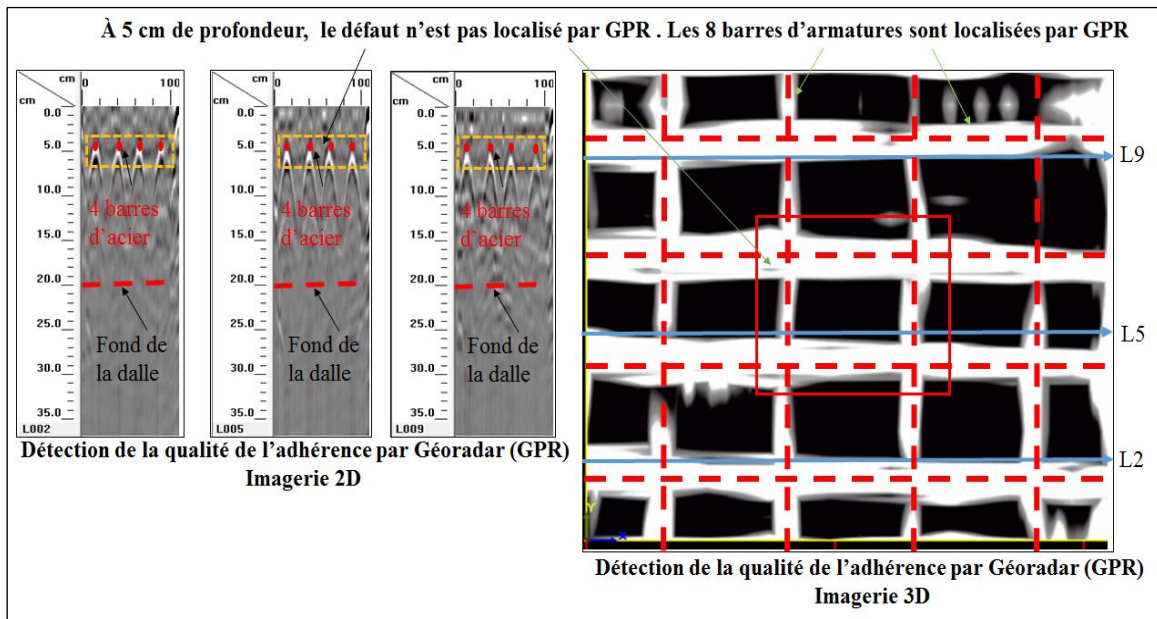


Figure 11.32 : Détection de la qualité de l'adhérence par Géoradar (GPR) – Dalle avec un défaut et huit barres d'armature horizontales dans les deux directions orthogonales placées à 5 cm de profondeur - Dalle N° 8.

### 11.3.3 Étude paramétrique : Profondeur du défaut

#### 11.3.3.1 Défaut placé à 15 cm de profondeur – Dalle expérimentale N°8

➤ Résultats expérimentaux (RI) - Approche développée

- Résultats d'analyse : Détection et évaluation du diamètre du défaut

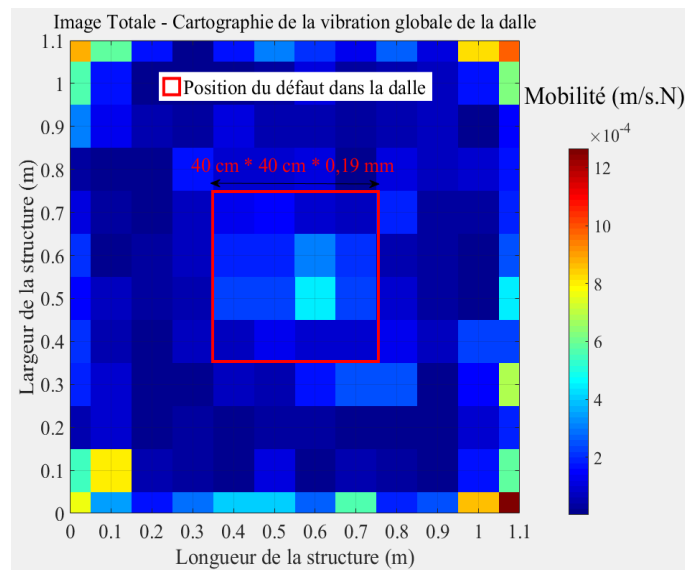


Figure 11.33 : Cartographie des mobilités moyennes obtenue à partir de la fréquence vibratoire globale moyenne de la dalle - Détection et estimation du diamètre du défaut.

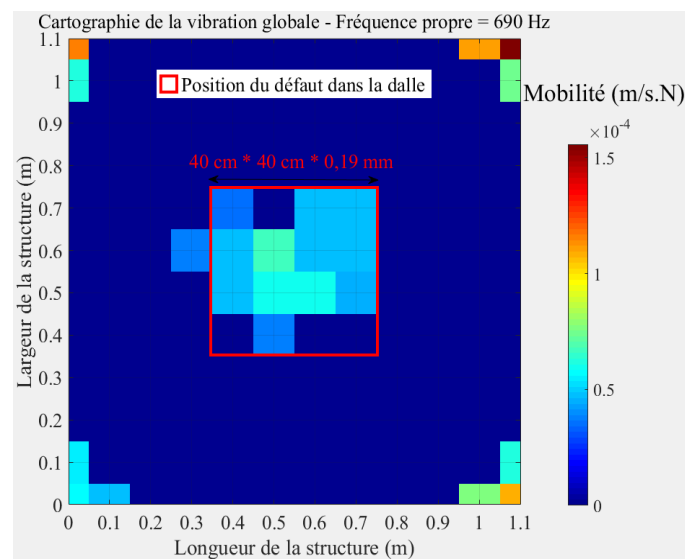


Figure 11.34 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 690 Hz.

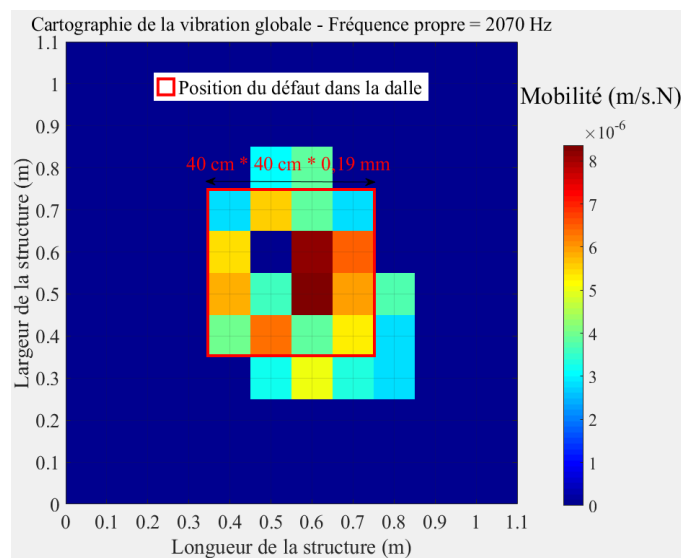


Figure 11.35 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 2070 Hz.

### ➤ Résultats : Approche conventionnelle

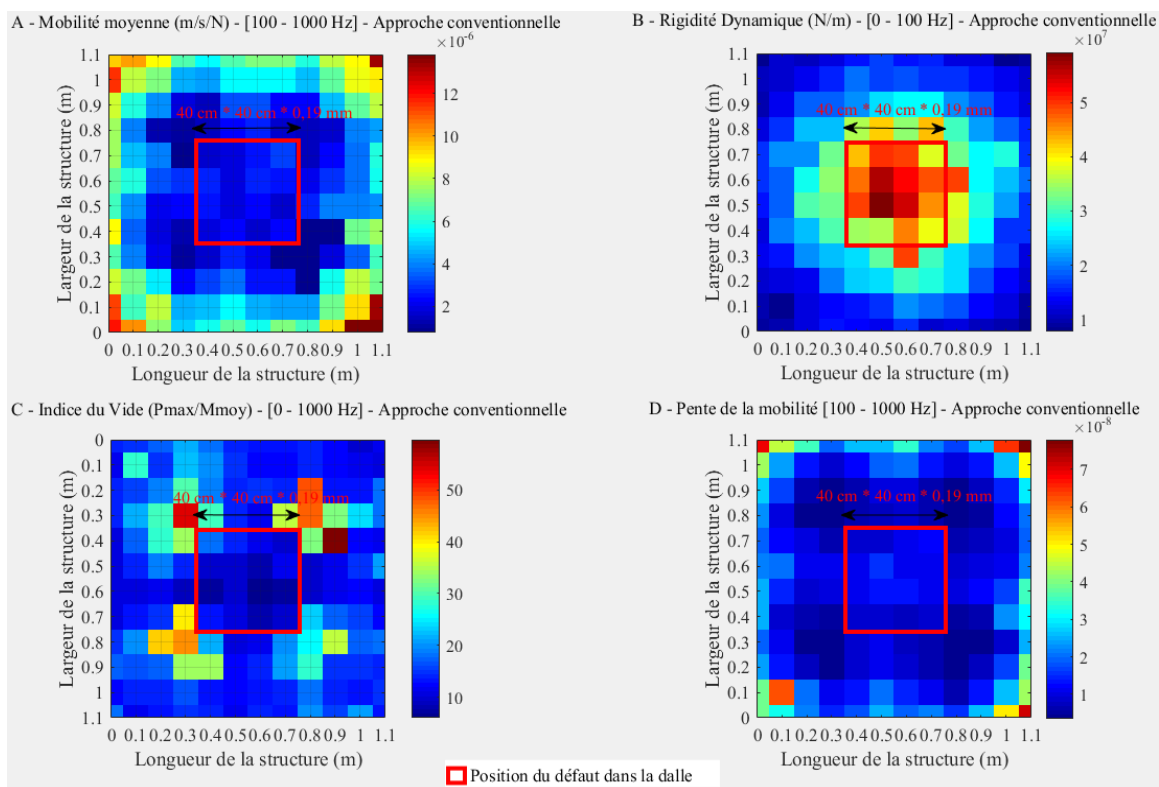


Figure 11.36 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes - B : Rigidité dynamique – C : Indice du vide – D : Pente de la mobilité.

➤ **Résultats : Approche « arithmétique » – Mobilité moyenne**

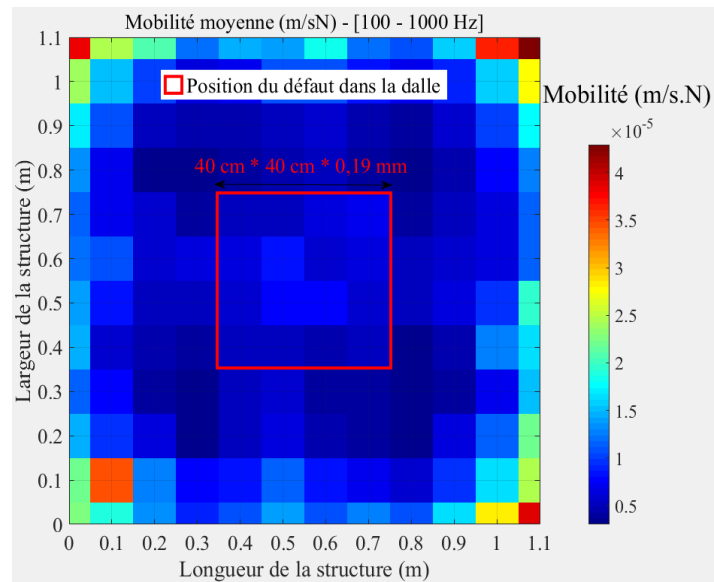


Figure 11.37 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes.

➤ **Résultats et analyse à partir de la méthode GPR**

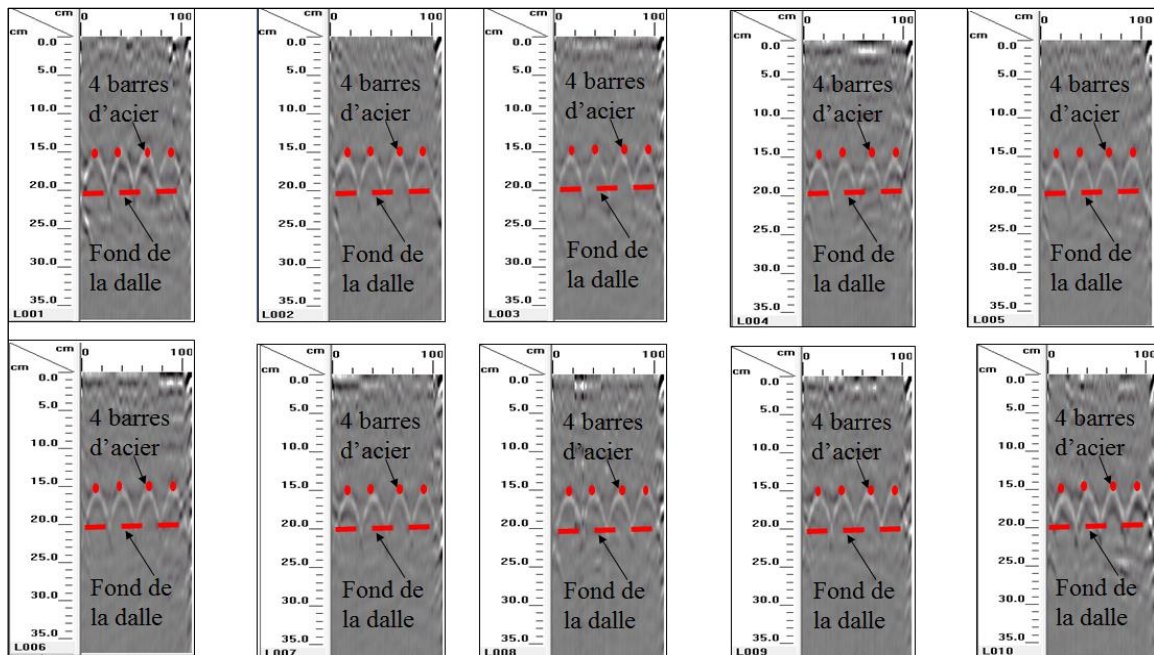


Figure 11.38 : Détection de la qualité de l'adhérence par Géoradar (Imagerie 2D) – Défaut placé à 15 cm de profondeur de la dalle – Dalle N° 8.



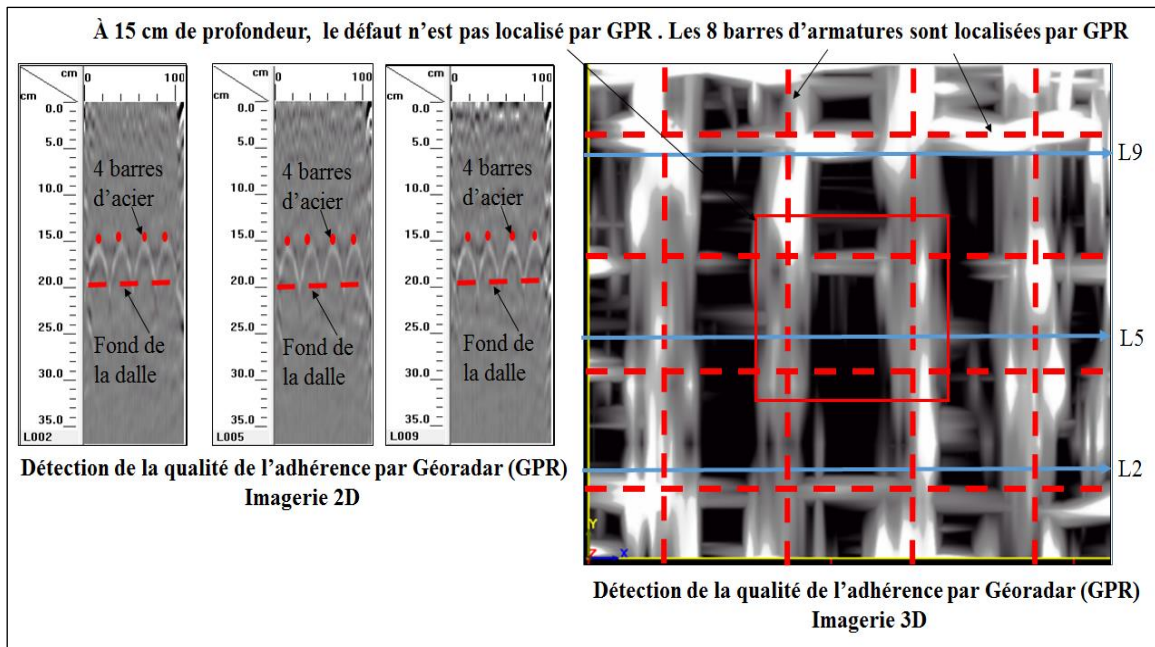


Figure 11.39 : Détection de la qualité de l'adhérence par Géoradar – Défaut placé à 15 cm de profondeur de la dalle - Dalle N° 8.

### 11.3.3.2 Défaut placé à 15 cm de profondeur – Dalle expérimentale N°6

#### ➤ Résultats expérimentaux (RI) - Approche développée

- Résultats d'analyse : Détection et évaluation du diamètre du défaut

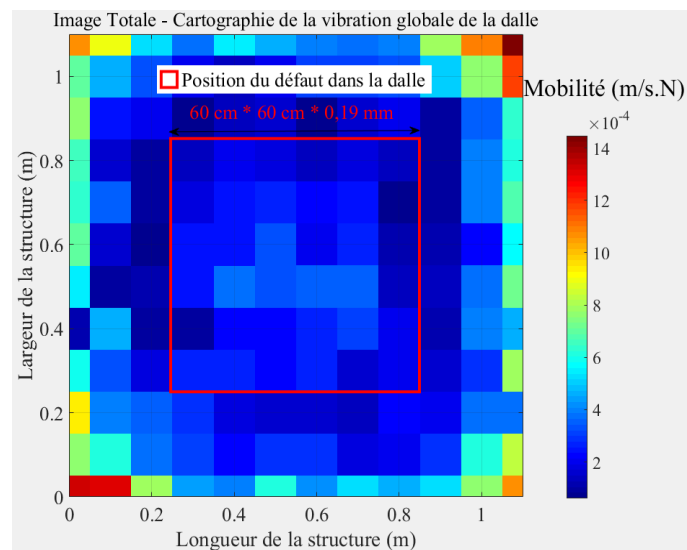


Figure 11.40 : Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection  
Cartographie de la vibration globale de la dalle.



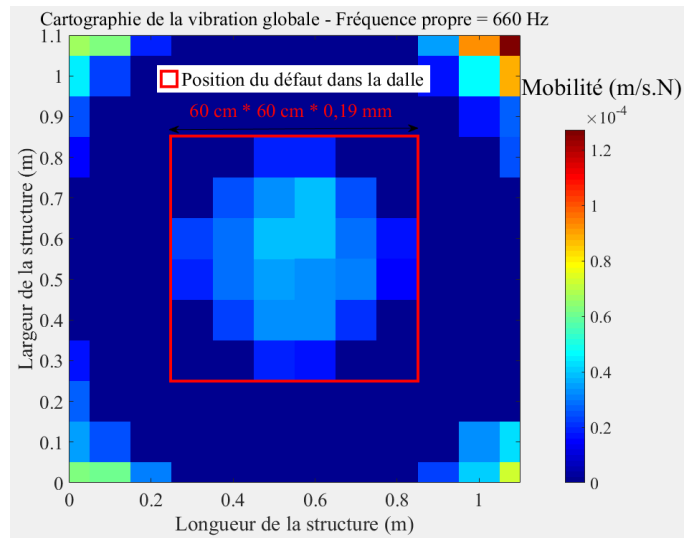


Figure 11.41 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 660 Hz.

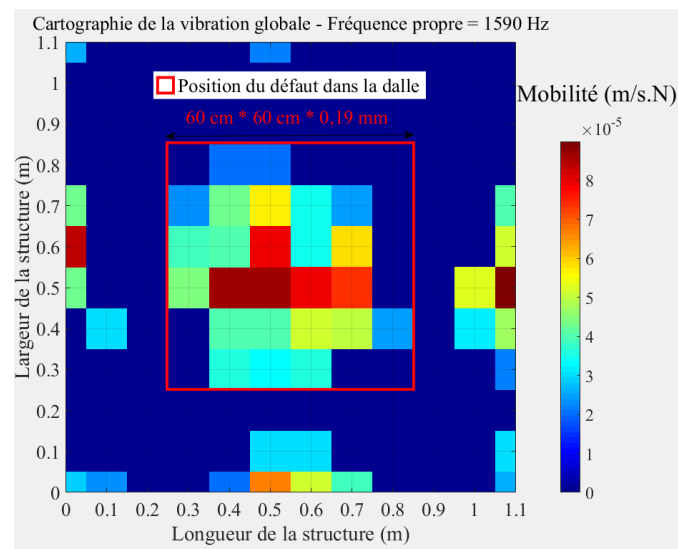


Figure 11.42 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 1590 Hz.

## ➤ Résultats : Approche conventionnelle

- Gamme de fréquences d'analyse : [0 – 1000 Hz]

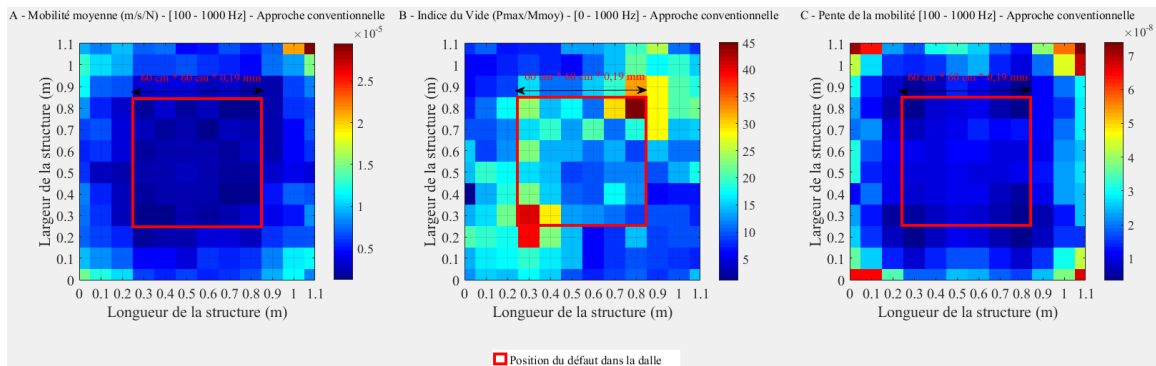


Figure 11.43 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes – B : Indice du vide – C : Pente de la mobilité.

- Gamme de fréquences d'analyse : [0 – 2000 Hz]

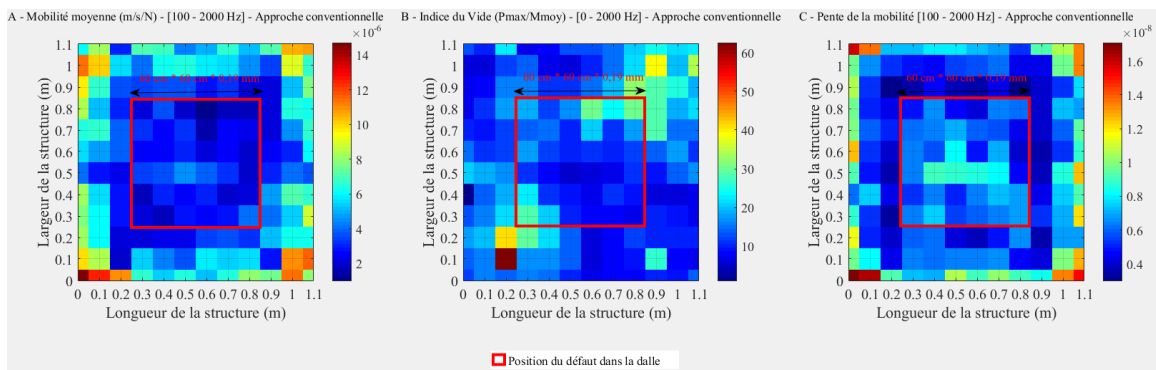


Figure 11.44 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes – B : Indice du vide – C : Pente de la mobilité.

➤ **Résultats : Approche « arithmétique » – Mobilité moyenne**

- **Gamme de fréquences d'analyse : [0 – 1000 Hz]**

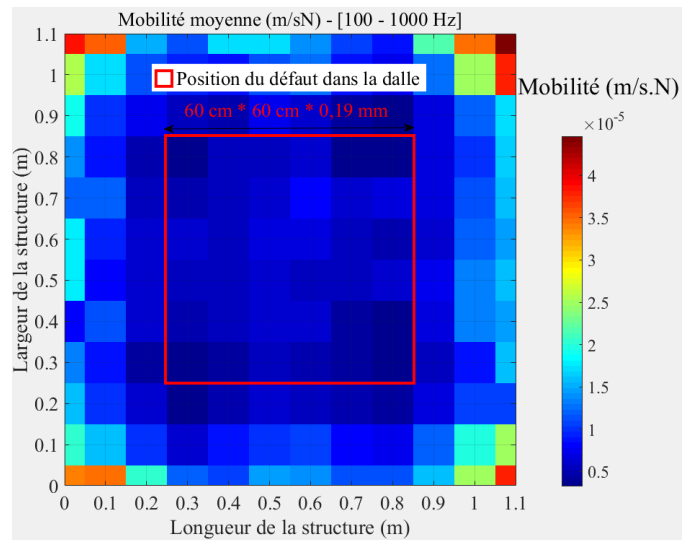


Figure 11.45 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes.

- **Gamme de fréquences d'analyse : [0 – 2000 Hz]**

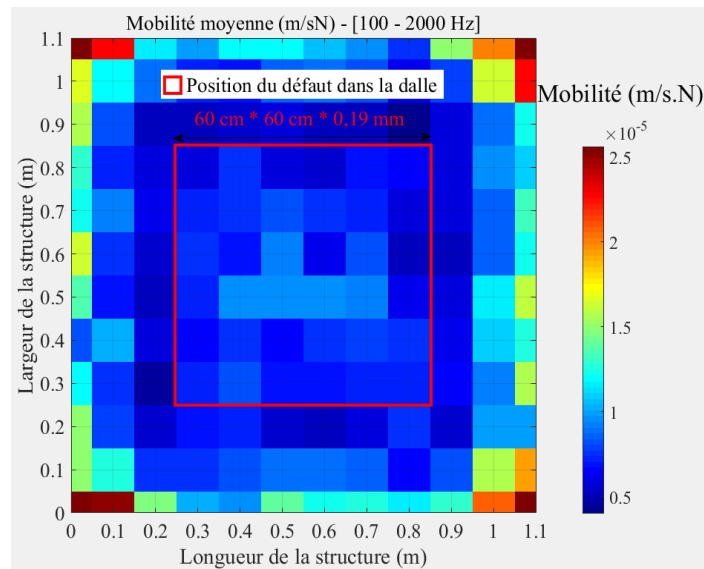


Figure 11.46 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes.

### 11.3.3.3 Défaut placé à 15 cm de profondeur – Dalle expérimentale N°4

#### ➤ Résultats expérimentaux (RI) - Approche développée

- Résultats d'analyse : Détection et évaluation du diamètre du défaut

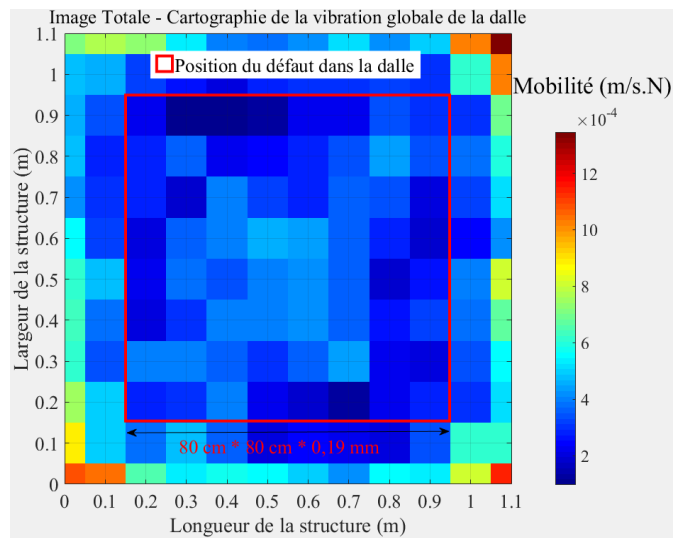


Figure 11.47 : Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection  
Cartographie de la vibration globale de la dalle.

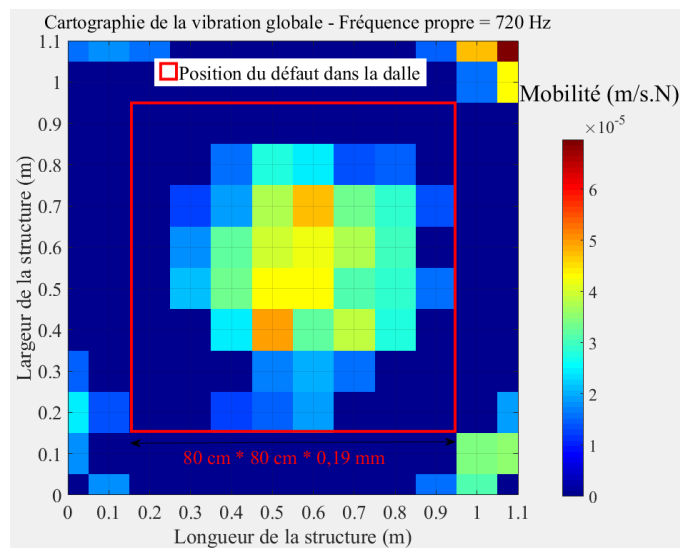


Figure 11.48 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre  
de vibration de 720 Hz.

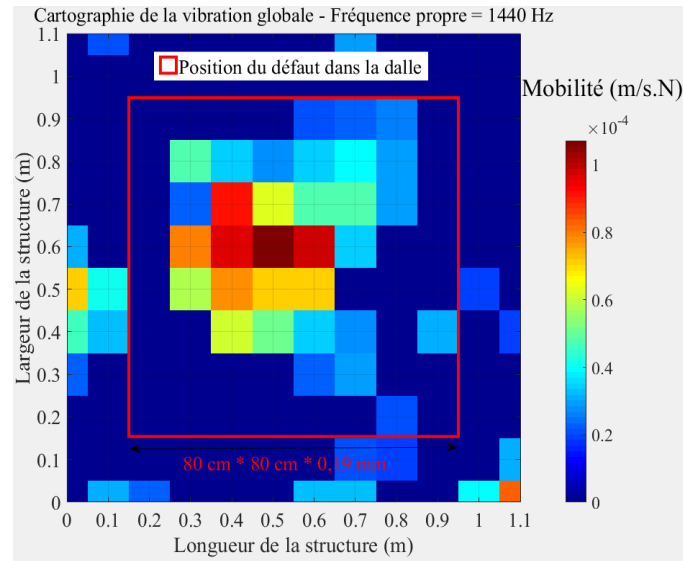


Figure 11.49 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 1440 Hz.

### ➤ Résultats : Approche conventionnelle

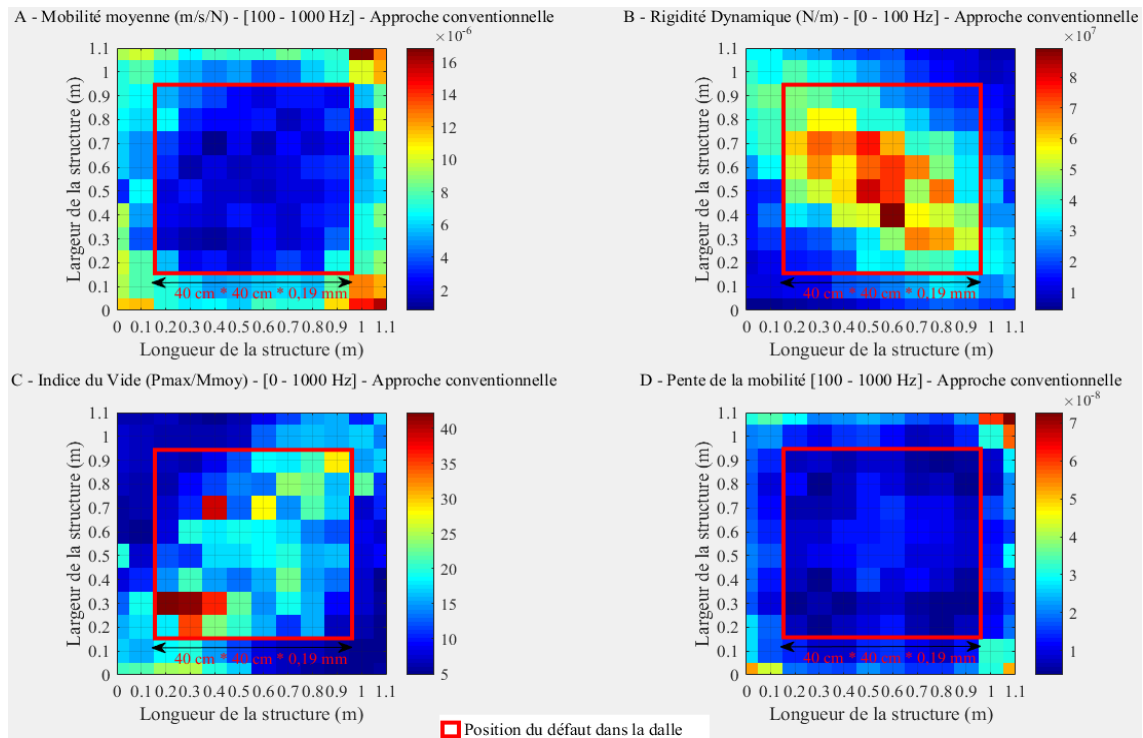


Figure 11.50 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes – B : Rigidité dynamique – C : Indice du vide – D : Pente de la mobilité.

➤ **Résultats : Approche « arithmétique » – Mobilité moyenne**

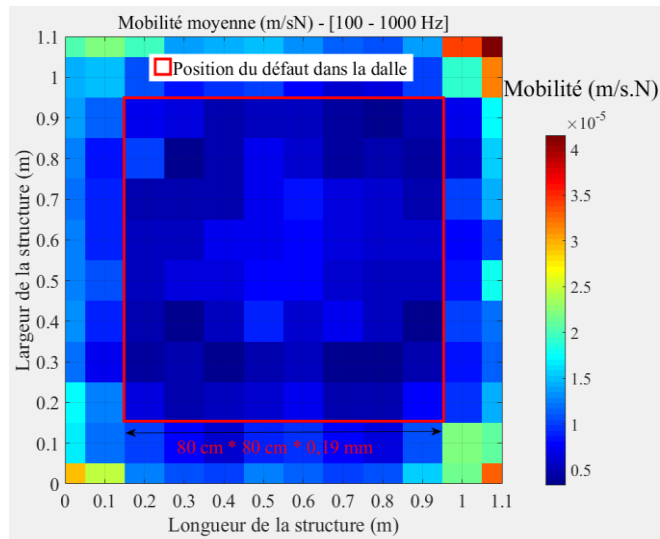


Figure 11.51 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes.

➤ **Résultats et analyse à partir de la méthode GPR**

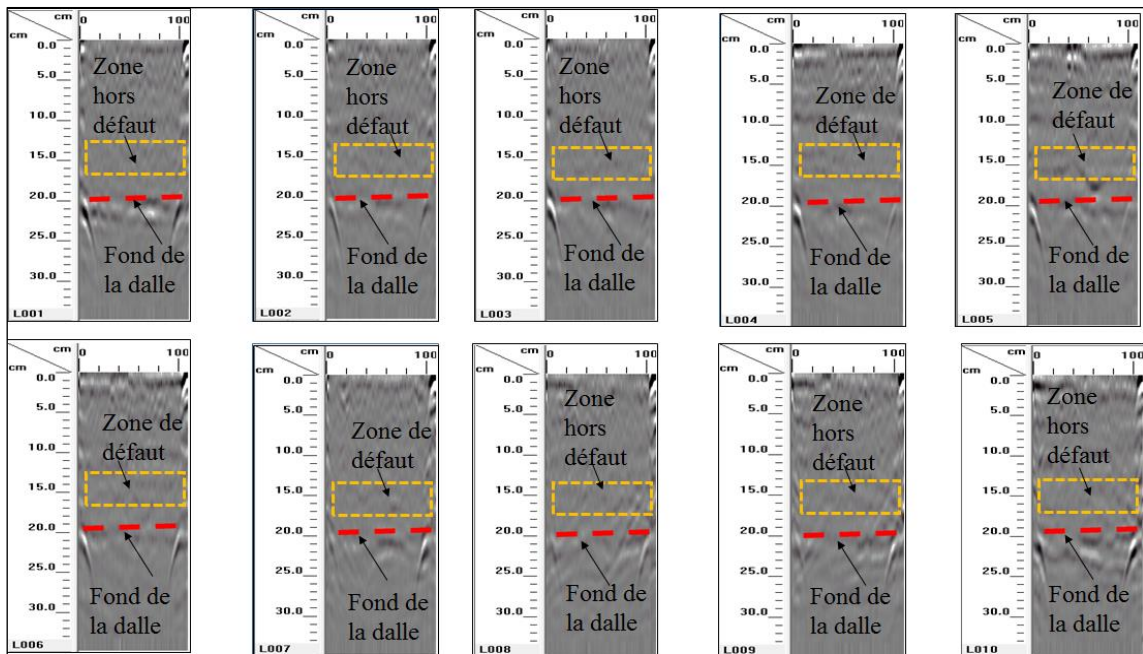


Figure 11.52 : Détection de la qualité de l'adhérence par Géoradar (Imagerie 2D) – Imagerie 2D Défaut placé à 15 cm de profondeur de la dalle – Dalle expérimentale N° 4.

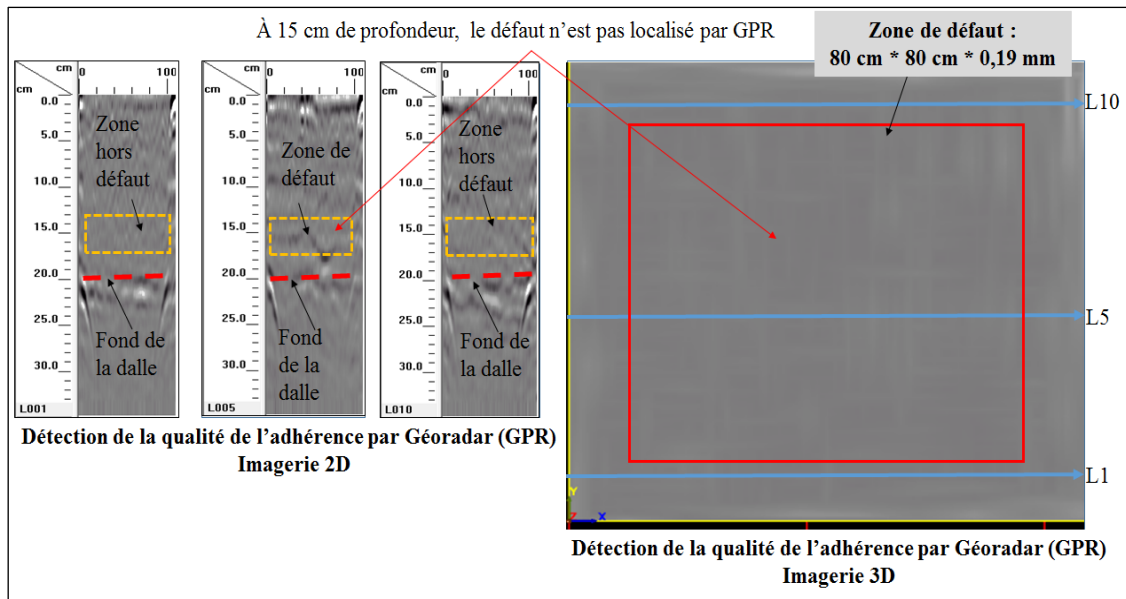


Figure 11.53 : Détection de la qualité de l'adhérence par Géoradar – Défaut placé à 15 cm de profondeur de la dalle - Dalle expérimentale N° 4.

### 11.3.4 Étude paramétrique : Effet de bords

#### 11.3.4.1 Défaut placé à 15 cm de profondeur – Dalle expérimentale N°6

- Résultats expérimentaux (RI) - Approche développée - Sans effets de bords
- Résultats d'analyse : Détection et évaluation du diamètre du défaut

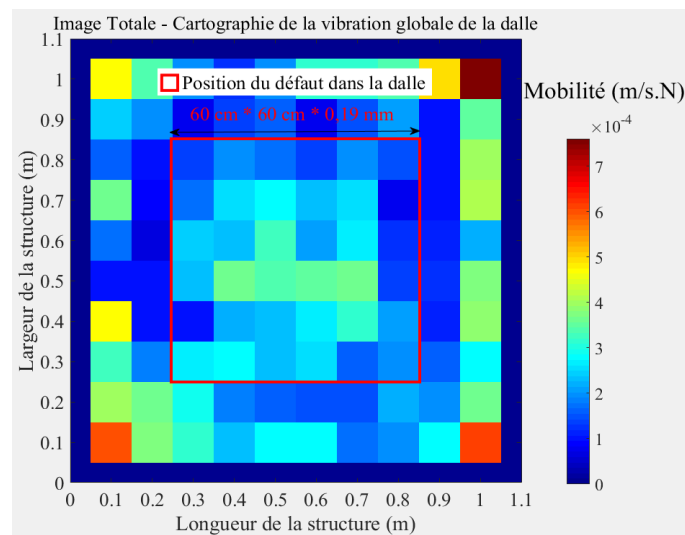


Figure 11.54 : Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection  
Cartographie de la vibration globale de la dalle.

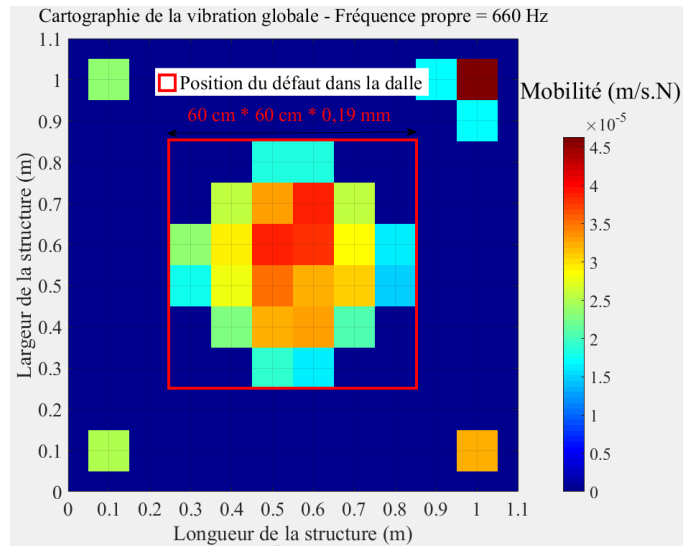


Figure 11.55 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 660 Hz.

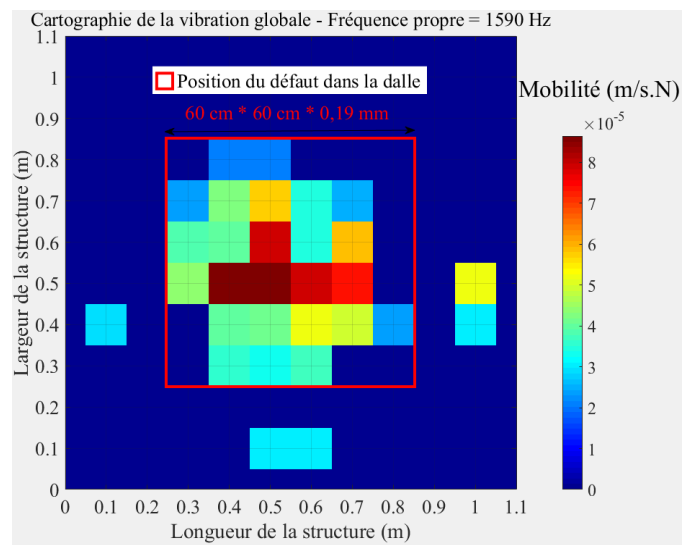


Figure 11.56 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 1590 Hz.



#### 11.3.4.2 Défaut placé à 15 cm de profondeur – Dalle expérimentale N°4

➤ Résultats expérimentaux (RI) - Approche développée - Sans effets de bords

- Résultats d'analyse : Détection et évaluation du diamètre du défaut

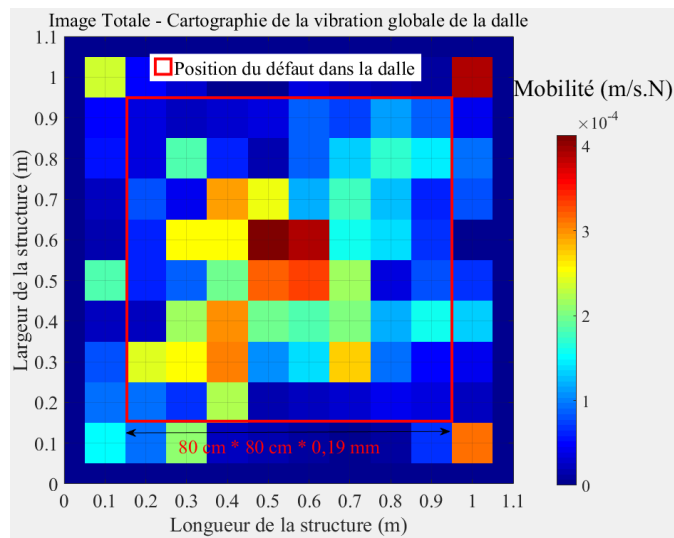


Figure 11.57 : Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection  
Cartographie de la vibration globale de la dalle.

- Cartographie pour l'estimation du diamètre et de la profondeur du défaut

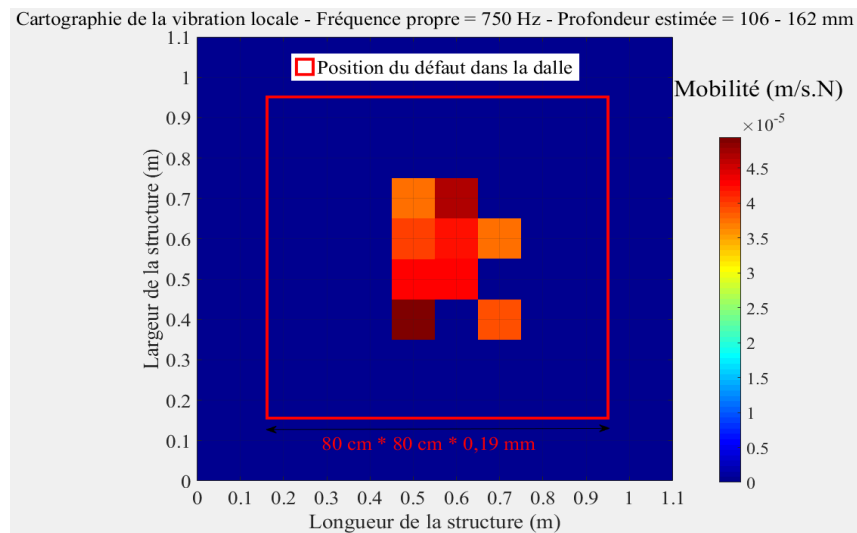


Figure 11.58 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour l'estimation du diamètre et la  
profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 750 Hz

### 11.3.5 Étude paramétrique : Position et nombre des défauts dans la dalle - Dalle expérimentale N°5

#### ➤ Résultats expérimentaux (RI) – Approche développée

- Résultats d'analyse : Détection et évaluation du diamètre des défauts

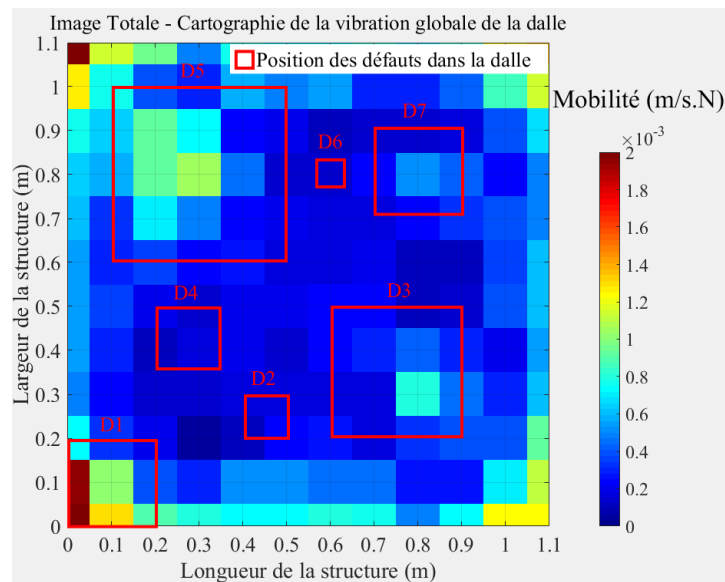


Figure 11.59 : Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection  
Cartographie de la vibration globale de la dalle.

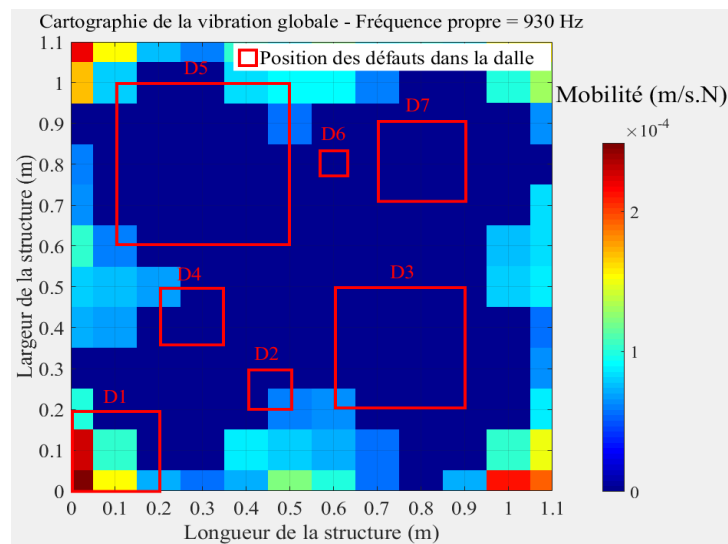


Figure 11.60 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre  
de vibration de 930 Hz.

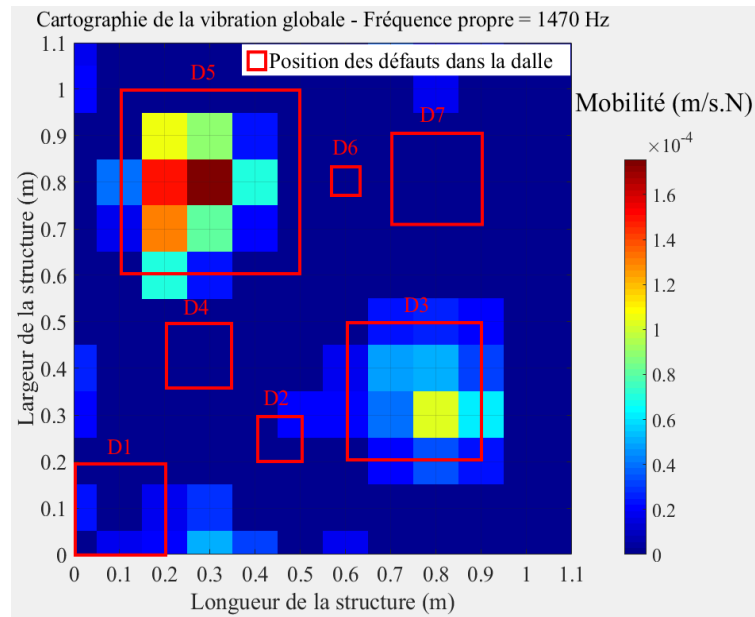


Figure 11.61 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 1470 Hz.

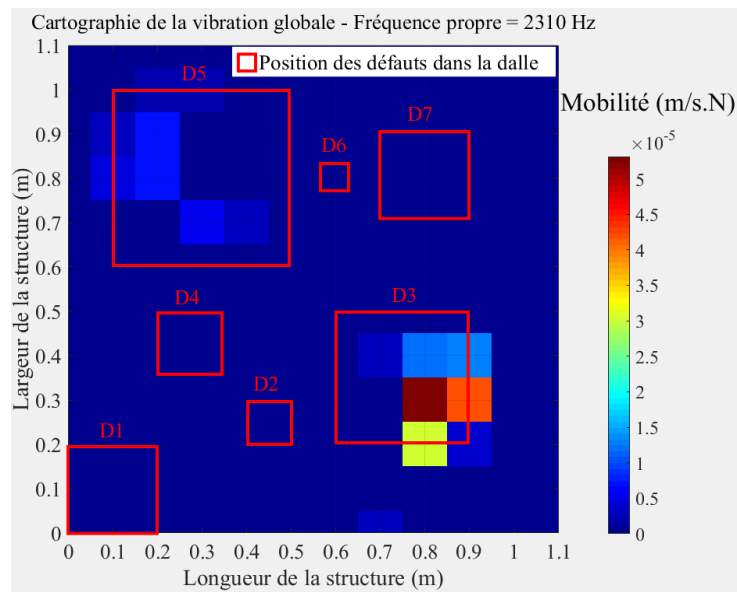


Figure 11.62 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection – Fréquence propre de vibration de 2310 Hz.

➤ **Résultats : Approche conventionnelle**

- **Gamme de fréquences d'analyse : [0 – 1000 Hz]**

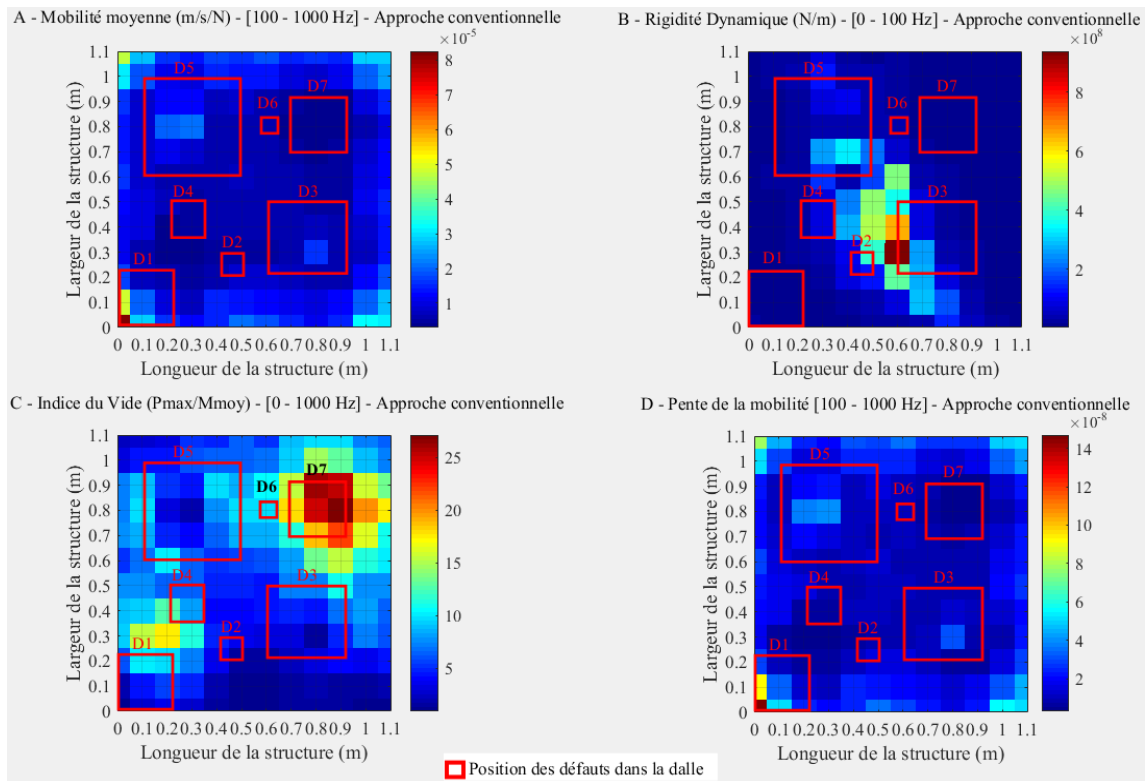


Figure 11.63 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes – B : Rigidité dynamique – C : Indice du vide – D : Pente de la mobilité.

- **Gamme de fréquences d'analyse : [0 – 2000 Hz]**

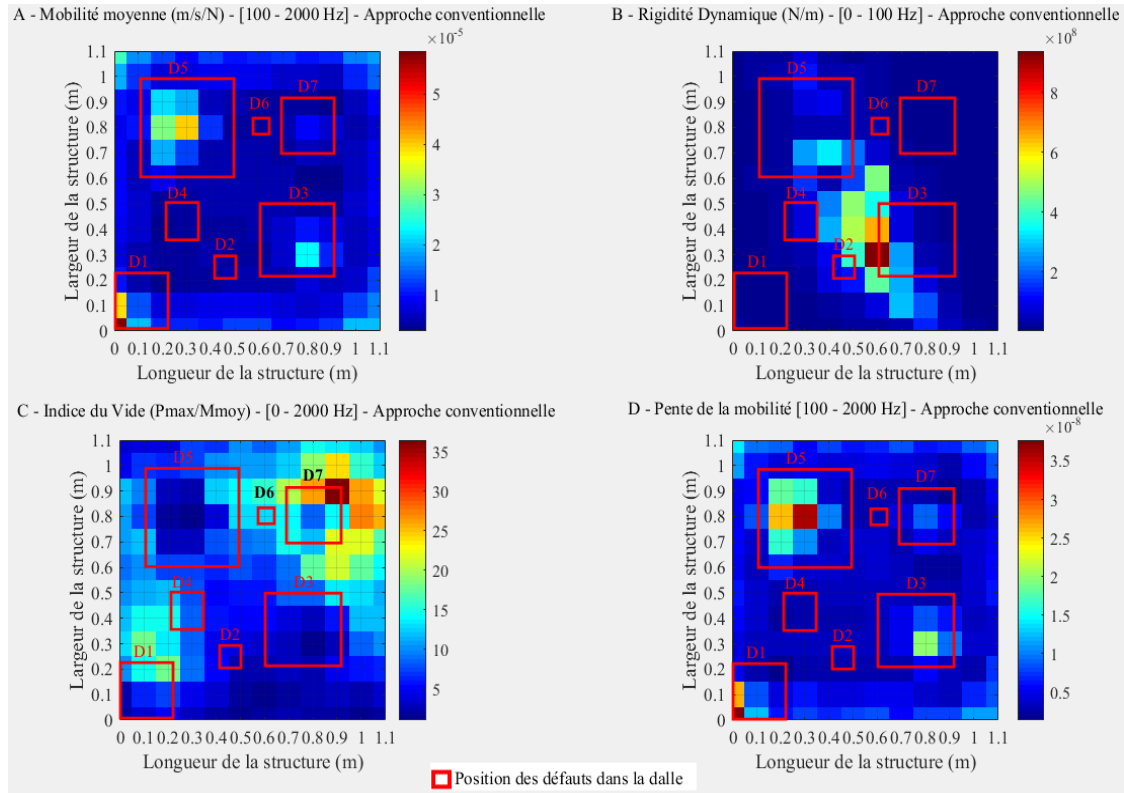


Figure 11.64 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes – B : Rigidité dynamique – C : Indice du vide – D : Pente de la mobilité.

### ➤ Résultats : Approche « arithmétique »

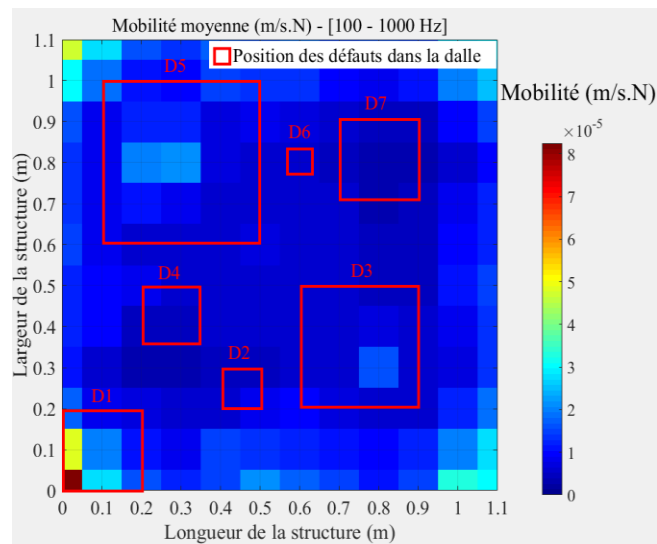


Figure 11.65 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes.

➤ Résultats et analyse à partir de la méthode d'Essai sonique

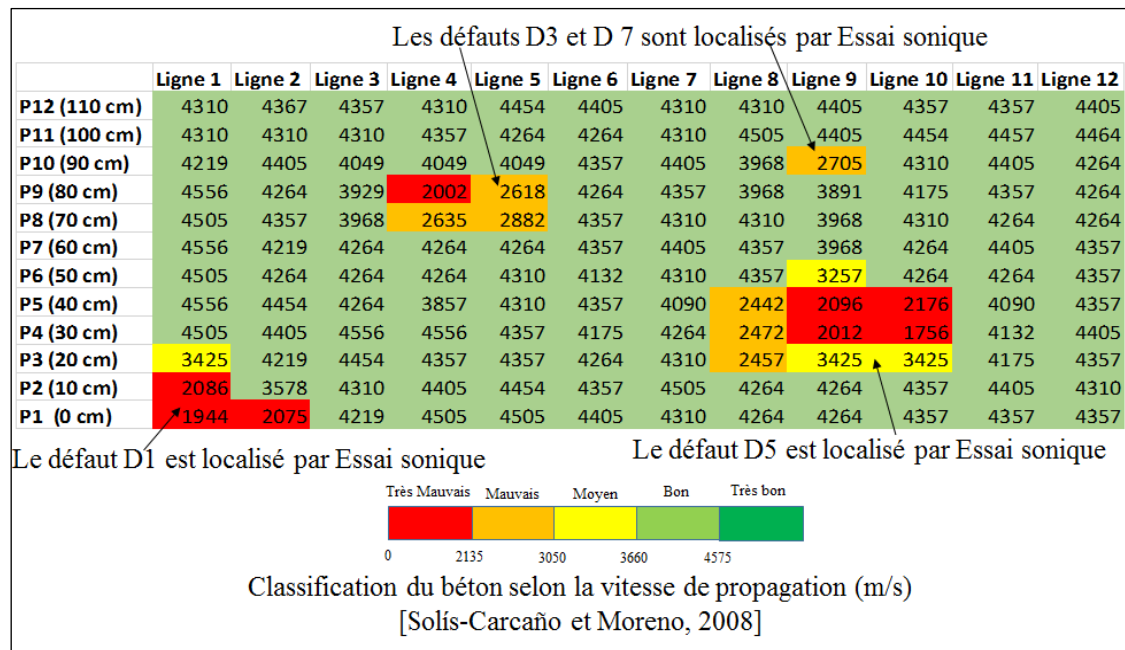


Figure 11.66 : Détection de la qualité de l'adhérence par Essai sonique – Mesure des vitesses des ondes de compression - Dalle expérimentale N° 5.

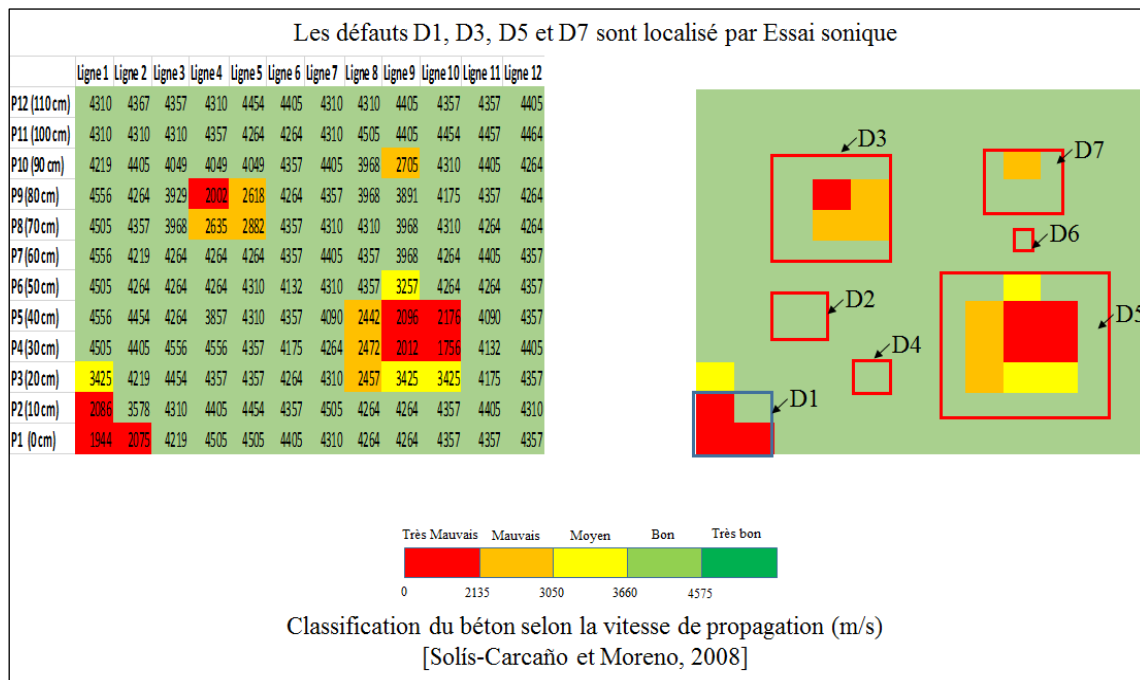


Figure 11.67 : Détection de la qualité de l'adhérence par Essai sonique – Mesure des vitesses des ondes de compression – Dalle expérimentale N° 5.

## ➤ Résultats et analyse à partir de la méthode GPR

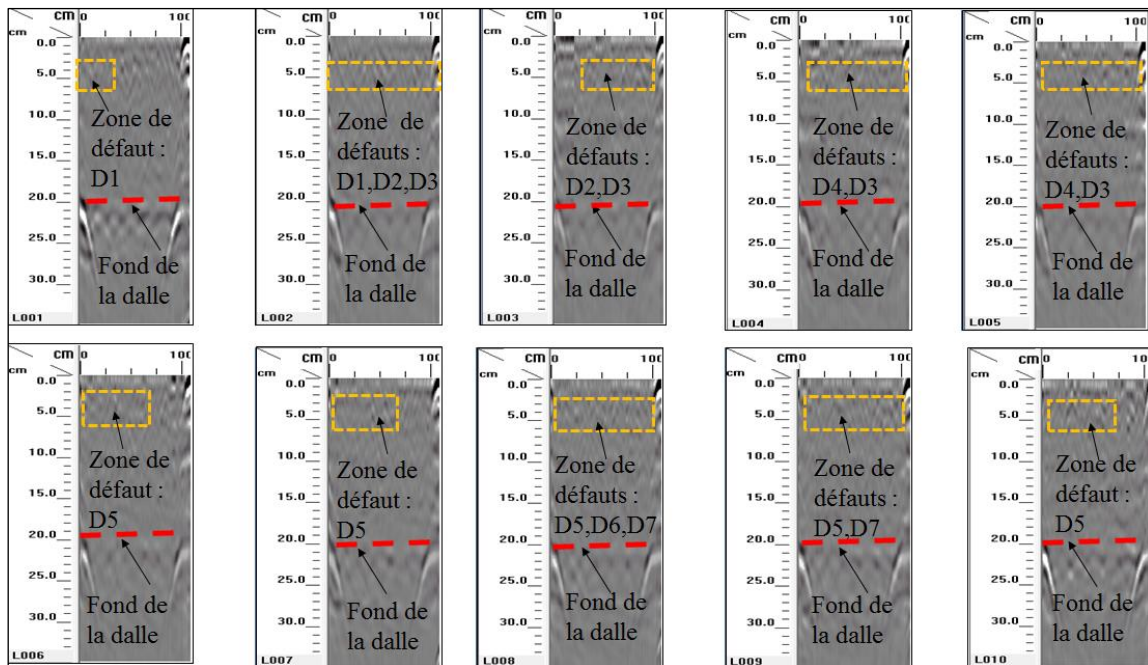


Figure 11.68 : Détection de la qualité de l'adhérence par Géoradar (GPR) – Imagerie 2D  
Défaut placé à 5 cm de profondeur de la dalle – Dalle N° 5.

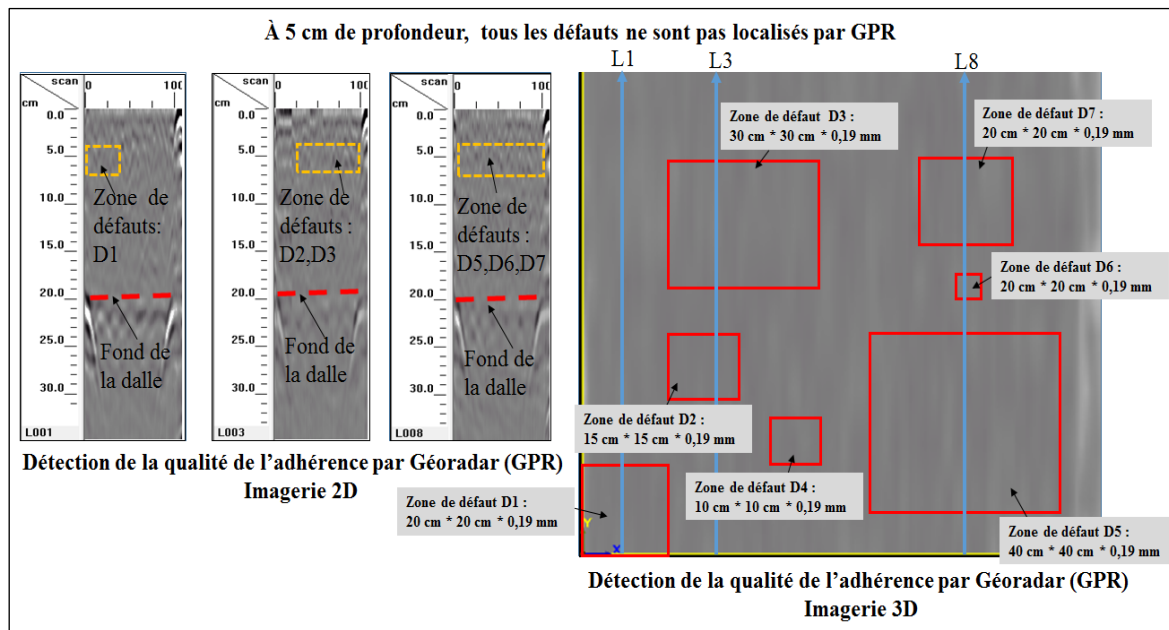


Figure 11.69 : Détection de la qualité de l'adhérence par Géoradar (GPR) – Défaut placé à 5 cm de profondeur de la dalle - Dalle N° 5.

## 11.4 Analyse des résultats de l'analyse paramétrique

### 11.4.1 Étude paramétrique par rapport à la nature de la source

Les résultats montrent qu'en réalisant les mesures sur la dalle expérimentale N°2 caractérisée par un défaut de dimensions 40 cm \* 40 cm \* 0,28 mm placé à 5 cm de profondeur à l'aide d'un marteau muni d'un embout en PVC :

- **L'approche d'analyse développée** permet uniquement la détection du défaut (**Figures 11.3, 4, 5**) et non l'estimation de sa profondeur. Les modes de vibration associés à différentes fréquences propres de la dalle sont des modes globaux (**Figure 11.4** où la fréquence propre de vibration est de 720 Hz et à la **Figure 11.5** où la fréquence propre de vibration est de 1500 Hz.

D'après l'étude modale, un tel défaut est supposé vibrer à une fréquence propre autour de 1500 Hz. On voit qu'à cette fréquence propre, c'est l'ensemble de la dalle qui vibre en mode globale (**Figure 11.5**). Ce mode ne permet donc pas d'estimer la profondeur du défaut.

- **L'approche conventionnelle** ne parvient pas à détecter le défaut avec précision à partir des paramètres d'analyse (**Figures 11.6, 7**). La zone de défaut est caractérisée par une forte rigidité dynamique (**Figure 11.6 B**) synonyme d'absence de défaut. La mobilité moyenne et la pente de la mobilité sont très faibles dans la zone de défaut pour envisager la présence d'un éventuel défaut dans la dalle (**Figure 11.6 A, D**).
- **L'approche dite « arithmétique »** ne permet pas aussi une détection évidente du défaut (**Figures 11.8, 9**).

Par contre l'utilisation d'un marteau muni d'un embout en acier montre :

- **L'approche d'analyse développée** parvient non seulement à détecter le défaut avec beaucoup plus de précision (**Figure 11.10**) mais aussi à estimer sa profondeur. Le défaut vibre à une fréquence propre de 1560 Hz et sa profondeur estimée en utilisant cette



fréquence varie entre **58 mm** et **88 cm** (**Figure 11.11**) ce qui est somme toute relativement intéressant comme précision.

- **L'approche conventionnelle** parvient à détecter le défaut en utilisant une telle source que ce soit dans la gamme de fréquences de traitement comprise entre 0 et 1000 Hz selon la norme ASTM C1740 (**Figure 11.12**) ou celle comprise entre 0 et 2000 Hz (**Figure 11.13**). Les trois paramètres d'analyse détectent bien la position du défaut dans la dalle. La mobilité moyenne et la pente de la mobilité sont plus fortes dans cette zone. L'indice du vide très faible dans cette zone donne également une indication sur la présence d'un défaut.
- **L'approche dite « arithmétique »** parvient également à bien détecter le défaut que ce soit entre la gamme de fréquence de traitement comprise entre 0 et 1000 Hz (**Figure 11.14**) ou entre 0 et 2000 Hz (**Figure 11.15**).

Le choix de la nature de la source est important dans la détection et la localisation des défauts. Pour la détection des défauts de petite taille et de très faible ouverture ou épaisseur, il faudra utiliser des sources dont les gammes de fréquences d'excitation sont grandes par exemple entre 0 et 3000 Hz pour un marteau muni d'un embout en aluminium ou entre 0 et 4000 Hz pour un marteau muni d'un embout en acier. L'utilisation d'un marteau muni d'un embout en PVC (gamme de fréquences comprise entre 0 et 1200 Hz) ne favorise pas la détection des défauts de petite taille lorsque le traitement des données de la RI est faite à partir de l'approche conventionnelle ou l'approche « arithmétique ». Avec une telle source (marteau avec embout en PVC), il est également impossible d'estimer la profondeur du défaut avec l'approche d'analyse développée, car elle ne permet pas de dissocier les modes locaux associés à la vibration de tels défauts aux modes globaux.

En comparaison avec d'autres méthodes d'auscultation, la méthode de GPR ne permet pas la détection et la localisation d'un tel défaut dans la dalle (**Figure 11.16** en 2D et la **Figure 11.17** en 3D).

### 11.4.2 Étude paramétrique pour des dalles avec barres d'armature

Les résultats de différents traitements de la dalle saine armée confirment que c'est une dalle sans défaut :

- **L'approche d'analyse développée** montre que tous les modes de vibration générés sont des modes essentiellement globaux (**Figures 11.18, 19, 20**). Par exemple, la dalle vibre en mode globale à des fréquences de 630 Hz (**Figure 11.19**) et 1410 Hz (**Figure 11.20**). Ce sont des modes qui sont associés à la vibration des bordures de la dalle.
- **L'approche conventionnelle** : La mobilité moyenne est très faible au centre de la dalle, mais forte sur les bords (**Figure 11.21 A**). La rigidité dynamique est également élevée (**Figure 11.21 C**).
- **L'approche dite « arithmétique »** : La mobilité moyenne de la dalle est quasiment homogène sur toute la dalle. Cela traduit que la dalle n'est pas affectée par des dégradations (**Figure 11.22**).
- **La technique de GPR**. Les barres d'armature sont bien détectées et on peut estimer leur profondeur à partir des cartographies obtenues (**Figure 11.23** en 2D, **Figure 11.24** en 3D).

Les résultats de la dalle armée N° 8 caractérisée par un défaut de dimensions 40 cm \* 40 cm \* 0,19 mm placé à 5 cm de profondeur montrent :

- **L'approche d'analyse développée** permet uniquement la détection du défaut (**Figures XI.25, 26**) et non l'estimation du diamètre du défaut.
- Les modes de vibration de l'ensemble de la dalle sont des modes plutôt globaux et ne permettent pas l'estimation de sa profondeur. La fréquence propre de vibration locale du défaut serait autour de **1560 Hz** (**Figure 11.26**). Malgré l'utilisation d'une source de fréquence d'excitation de l'ordre de 3000 Hz, on constate que le mode de vibration associé à ce défaut ne se dégage pas, mais plutôt interfère avec d'autres modes de la

dalle pour former un mode global. Pour un tel défaut de petite taille dans une dalle armée, l'augmentation de la rigidité de la dalle réduirait la capacité du défaut à vibrer localement.

- **L'approche conventionnelle** ne parvient pas à détecter le défaut avec précision à partir des paramètres d'analyse (**Figures 11.27, 28**). En considérant le traitement des données dans la gamme de fréquences de 0 à 2000 Hz, on voit que la zone de défaut est caractérisée par une forte rigidité dynamique (**Figure 11.27 B**) synonyme d'absence de défaut. La mobilité moyenne et la pente de la mobilité sont très faibles dans la zone de défaut (**Figure 11.27 A, D**). L'indice de vide est très faible dans la zone de défaut (**Figure 11.27 C**) ce qui justifie la présence d'un défaut.
- **L'approche dite « arithmétique »** ne permet pas aussi une détection évidente du défaut (**Figures 11.29, 30**).
- **La technique de GPR** ne parvient pas à détecter un tel défaut. Par contre, les barres d'armature sont détectées et on peut estimer leurs profondeurs (**Figure 11.31** en 2D, **Figure 11.32** en 3D).

Les dalles avec des barres d'armature augmentent la rigidité des dalles. On voit que malgré l'utilisation d'une source dont la gamme de fréquences est comprise entre 0 et 3000 Hz (marteau muni d'un embout en aluminium) le défaut n'est pas suffisamment détecté par l'approche de traitement conventionnelle ou l'approche « arithmétique ». La méthode GPR ne parvient pas aussi à détecter le défaut. L'approche d'analyse développée arrive à détecter ce type de défaut à partir des fréquences propres de vibration, mais ne permet pas d'évaluer sa profondeur. Les barres d'armature ont donc un impact sur la réponse dynamique. Elles augmentent la rigidité de la dalle et les défauts de petite taille et de petite ouverture ou de petites épaisseurs sont difficiles à caractériser.

### 11.4.3 Étude paramétrique par rapport à la profondeur du défaut

Les résultats de la dalle armée N° 8 caractérisée par un défaut de dimensions 40 cm \* 40 cm \* 0,19 mm placé à 15 cm de profondeur montrent :

- **L'approche d'analyse développée** permet uniquement la détection du défaut et non l'estimation de sa profondeur à partir de ses modes de vibration. Les modes de vibration de l'ensemble de la dalle sont des modes globaux (**Figures 11.33, 34, 35**). Les différents modes de vibration de la dalle aux fréquences propres respectives de 690 Hz (**Figures 11.34**) et 2070 Hz (**Figures 11.35**) détectent bien le défaut placé à 15 cm de profondeur.

La profondeur et les barres d'armature augmentent la rigidité de la dalle. Pour des défauts de petite taille, leur mode propre (premier mode) interfère avec d'autres modes de vibration pour former des modes globaux. Dans ce cas, la profondeur du défaut ne peut pas être estimée.

- **L'approche conventionnelle** ne parvient pas à détecter le défaut à partir des paramètres d'analyse (**Figure 11.36**). La zone de défaut est caractérisée par une forte rigidité dynamique (**Figure 11.36 B**) synonyme d'absence de défaut. La mobilité moyenne et la pente de la mobilité sont très faibles dans la zone de défaut pour envisager la présence d'un éventuel défaut dans la dalle (**Figure 11.36 A, D**).
- **L'approche dite « arithmétique »** ne permet pas aussi une détection évidente du défaut (**Figure 11.37**).
- **La technique de GPR** ne parvient pas à détecter un tel défaut. Par contre, les barres d'armature sont détectées et l'on peut estimer leurs profondeurs (**Figure 11.38 en 2D, Figure 11.39 en 3D**).

Les résultats de la dalle armée N° 6 caractérisée par un défaut de dimensions 60 cm \* 60 cm \* 0,19 mm placé à 15 cm de profondeur montrent :

- **L'approche d'analyse développée** permet uniquement la détection du défaut et non l'estimation de sa profondeur à partir de ses modes de vibration. Les modes de vibration de l'ensemble de la dalle sont des modes globaux (**Figures 11.40, 41, 42**). Les différents modes de vibration de la dalle aux fréquences propres respectives de 660 Hz

(Figures 11.41) et 1590 Hz (Figures 11.42) sont des modes globaux, mais détectent bien le défaut placé à 15 cm de profondeur.

- **L'approche conventionnelle** ne parvient pas à détecter avec précision le défaut à partir des paramètres d'analyse (Figures 11.43, 44). La mobilité moyenne et la pente de la mobilité sont très faibles dans la zone de défaut pour envisager la présence d'un éventuel défaut dans la dalle (Figure 11.43 A, D).
- **L'approche dite « arithmétique »** ne permet pas aussi une détection précise du défaut (Figures 11.45, 46) à une telle profondeur.

Les résultats de la dalle armée N° 4 caractérisée par un défaut de dimensions 80 cm \* 80 cm \* 0,19 mm placé à 15 cm de profondeur montrent :

- **L'approche d'analyse développée** permet uniquement la détection du défaut et non l'estimation de sa profondeur à partir de ses modes de vibration. Les modes de vibration de l'ensemble de la dalle sont des modes globaux (Figures 11.47, 48, 49). Les différents modes de vibration de la dalle aux fréquences propres respectives de 720 Hz (Figures 11.48) et 1440 Hz (Figures 11.49) sont des modes globaux, mais détectent bien le défaut placé à 15 cm de profondeur.
- **L'approche conventionnelle** ne parvient pas à détecter avec précision le défaut à partir des paramètres d'analyse (Figure 11.50). La zone de défaut est caractérisée par une forte rigidité dynamique (Figure 11.50 B) synonyme d'absence de défaut. La mobilité moyenne et la pente de la mobilité sont très faibles dans la zone de défaut pour envisager la présence d'un éventuel défaut dans la dalle (Figure 11.50 A, D). L'indice du vide est également élevé dans la zone de défaut (Figure 11.50 C). Un indice de vide faible indique la présence d'un vide sous une dalle.
- **L'approche dite « arithmétique »** ne permet pas aussi une détection évidente du défaut (Figure 11.41).

- **La technique de GPR** ne parvient pas à détecter un tel défaut à 15 cm de profondeur (**Figure 11.52** en 2D, **Figure 11.53** en 3D).

La profondeur a un effet sur la détection des défauts notamment des défauts de petite taille et de petite ouverture inférieure à l'ordre du millimètre. L'ouverture des défauts de tous les défauts étudiés est de 0,19 mm. Cette ouverture correspond au seuil critique d'ouverture (0,20 mm) de la perte d'adhérence entre deux dalles. De tels défauts à 15 cm de profondeur sont difficilement détectables par les approches conventionnelles et « arithmétique », mais aussi par la méthode de GPR. Seule l'approche d'analyse développée parvient à détecter avec précision de tels défauts placés à 15 cm de profondeur en se basant sur l'étude des différentes fréquences propres de vibration.

#### **11.4.4 Étude paramétrique par rapport à l'effet de bord**

Les résultats de la dalle armée N° 6 caractérisée par un défaut de dimensions 60 cm \* 60 cm \* 0,19 mm placé à 15 cm de profondeur montrent :

- **L'approche d'analyse développée** permet uniquement la détection du défaut et non l'estimation de sa profondeur à partir de ses modes de vibration. Les modes de vibration de l'ensemble de la dalle sont des modes globaux (**Figures 11.54, 55, 56**). La taille du défaut peut expliquer cette situation.

Malgré le fait d'avoir supprimé les points de mesures sur les bordures de la dalle, on voit toujours que les modes associés à la vibration de ses bordures dominent toujours et affectent la réponse vibratoire notamment en termes d'estimation de la profondeur du défaut. Les différents modes de vibration de la dalle aux fréquences propres respectives de 660 Hz (**Figure 11.55**) et 1590 Hz (**Figure 11.56**) sont des modes globaux, mais détectent bien le défaut placé à 15 cm de profondeur.

Les résultats de la dalle armée N° 4 caractérisée par un défaut de dimensions 80 cm \* 80 cm \* 0,19 mm placé à 15 cm de profondeur montrent :

- **L'approche d'analyse développée** permet la détection du défaut (**Figure 11.57**) mais aussi l'estimation de sa profondeur à partir de ses modes de vibration à partir de sa

fréquence propre de vibration (**Figure 11.58**). Le défaut vibre à une fréquence propre de 750 Hz et sa profondeur estimée en utilisant cette fréquence varie entre **106 mm** et **162 cm** (**Figure 11.58**) ce qui semble réaliste.

Nous avons vu que les conditions d'effet de bord affectent la détection ainsi que la caractérisation (évaluation du diamètre et de la profondeur) des défauts. Les bordures des structures vibrent également selon une ou plusieurs fréquences propres.

En effet en analysant la dalle saine selon l'approche d'analyse développée, il en résulte des cartographies dans lesquelles dominent principalement les modes associés à la vibration des bordures. Exemples pour le cas de la dalle saine armée N° 7 (**Figures 11.18, 19, 20**) et pour le cas de la dalle saine sans barres d'armature N° 3 des résultats numériques (**Figures 10.4, 5**) et des résultats expérimentaux (**Figures 10.6, 7, 8**).

Donc la détection des défauts situés notamment à la frontière des bordures d'une dalle peut être altérée du fait de l'effet de bord. Les modes de vibration associés à la vibration des bordures d'une dalle interfèrent avec les modes de vibration associés à la vibration du défaut formant un système de vibration globale. Dans ce cas, le défaut peut être détecté, mais ne peut pas être caractérisé, c'est-à-dire être en mesure d'estimer sa profondeur selon l'hypothèse formulée dans l'approche développée qui ne prend en compte le calcul de la profondeur qu'en utilisant les modes de vibrations locaux de premier ordre.

Les résultats d'analyse de la dalle N° 4 avec un défaut de 80 cm \* 80 cm \* 0,19 mm placé à 15 cm de profondeur sans la suppression des points de mesures sur les bordures de la dalle donnent des cartographies dont les modes de vibration sont principalement globaux (**Figure 11.50**). Le même défaut lorsqu'on supprime les modes associés à la vibration des bordures, on obtient des cartographies où seul le défaut vibre. Le défaut vibre à une fréquence propre de **750 Hz**. Dans ce cas, on parvient à estimer la profondeur du défaut (**Figure 11.58**).

Pour une meilleure caractérisation des défauts notamment de profondeur, il sera recommandé de supprimer les modes de vibrations associés à la vibration des bordures. Il suffit de ne pas prendre en compte les mesures de la RI sur les bordures des structures à ausculter.

### 11.4.5 Étude paramétrique par rapport à la position et au nombre des défauts

Les résultats de la dalle armée N°5 caractérisée par plusieurs défauts de dimensions différentes (**Figure 11.2**) placé à 5 cm de profondeur montrent :

- **L'approche d'analyse développée** permet uniquement la détection des défauts (notamment les défauts D1, D3, D7 et D5) et non l'estimation de leur profondeur (**Figures 11.59, 60, 61, 62**).

Le défaut D1 de dimensions 20 cm \* 20 cm \* 0,19 mm situé sur la bordure de la dalle est détectable. Ce défaut vibre à une fréquence de 930 Hz avec l'ensemble de la dalle (**Figure 11.60**). Par contre, le défaut D7 de mêmes dimensions que D1 placé plus ou moins à l'intérieur n'est pas détectable à cette fréquence. L'effet de bord expliquerait la différence de détection entre les deux défauts. Les défauts situés au centre des dalles ont une mobilité beaucoup plus faible que les défauts situés aux bords des dalles. Ainsi, la détection est plus difficile pour les défauts de diamètre inférieur à 20 cm \* 20 cm situés au centre des dalles.

Les défauts D3 et D5 sont très bien détectables à la fréquence de vibration égale à **1470 Hz (Figure 11.61)**. Cette fréquence correspond en réalité à la fréquence de vibration du défaut D5 de dimensions 40 cm \* 40 cm \* 0,19 mm. En effet, le défaut D5 vibre à la fréquence de **1458 Hz** d'après les résultats expérimentaux des courbes de mobilité spectrale (**Annexe B.5, Figure B.29**). Cette fréquence de 1470 Hz fournie par l'approche développée est quasiment similaire à celles obtenues sur la dalle expérimentale N°1 (défaut de dimensions 40 cm \* 40 cm \* 2 mm situé au centre de la dalle) d'après les résultats cartographiques numérique (1430 Hz) et expérimentale (1470 Hz) obtenus à partir de l'approche développée. On voit que la position du défaut et l'état de dégradation des structures (dalles à multi-défauts) n'affectent pas considérablement la fréquence de vibration des défauts et donc la réponse dynamique.



Le défaut D3 de dimensions 30 cm \* 30 cm \* 0,19 mm est également détecté à la fréquence de vibration égale à 2310 Hz (**Figure 11.62**). Les défauts de petite taille, de diamètre inférieur à 20 cm \* 20 cm (D2, D4 et D6) ne sont pas détectables.

Tous les défauts vibrent à toutes les fréquences en mode global. Aucun défaut ne vibre en mode local. Il y a interférence des modes du fait surement de l'étroitesse de la dalle et de la proximité des défauts. Une dalle plus large avec des défauts éloignés les uns des autres, dissocierait les modes de vibration des défauts et permettrait d'estimer la profondeur de chaque défaut.

- **L'approche conventionnelle** ne parvient pas à détecter la plupart des défauts à partir des paramètres d'analyse (**Figures 11.63, 64**). Seules la mobilité moyenne (**Figure 11.64 A**) et la pente de la mobilité (**Figure 11.64 D**) parviennent à mieux détecter les défauts D1, D3, D5, et D7 lorsque l'analyse des données est faite dans la gamme de fréquence comprise entre 0 et 2000 Hz.
- **L'approche « arithmétique »** ne parvient pas à détecter la plupart des défauts. Les défauts D1 et D5 sont sensiblement détectés lorsque la gamme de fréquence de traitement est comprise entre 0 et 1000 Hz (**Figure 11.65**).
- **L'essai sonique** parvient à détecter les défauts de tailles D1, D3, D5 et D7. Les défauts D2, D4 et D6 ne sont pas détectables du fait de leur taille trop petite (**Figures 11.66, 67**). Pour augmenter la probabilité de détection, il faut encore réduire le pas de mesure. Ici les mesures ont été effectuées avec un pas de mesure de 10 cm entre points de mesure.
- **La technique de GPR** ne parvient pas à détecter de tels défauts (**Figure 11.68** en 2D, **Figure 11.69** en 3D).

#### **11.4.6 Étude paramétrique par rapport à la gamme de fréquence de traitement**

La gamme de fréquences affecte beaucoup la détection et l'estimation des caractéristiques des défauts et notamment des défauts de diamètre inférieur à 50 cm \* 50 cm. En effet, pour ces défauts dont les fréquences propres de vibration locale se situent au-delà de 1000 Hz

(**Figure 7.7**), le traitement des données doit se faire en considérant des gammes de fréquences plus grandes entre 0 et 2000 Hz, entre 0 et 3000 Hz ou entre 0 et 4000 Hz.

Les résultats montrent par exemple que les défauts sont mieux détectés avec l'approche conventionnelle de traitement en utilisant la gamme de fréquence comprise entre 0 et 2000 Hz qu'en utilisant la gamme de fréquence comprise entre 0 et 1000 Hz, ainsi :

- Pour les études par rapport à la nature de la source : La détection est plus précise en utilisant la gamme de fréquences de traitement comprise entre 0 et 2000 Hz (**Figure 11.7**) comparé à la gamme de fréquence de traitement comprise entre 0 et 1000 Hz (**Figure 11.6**).
- Étude par rapport aux dalles armées : La détection est plus précise en utilisant la gamme de fréquence de traitement comprise entre 0 et 2000 Hz (**Figure 11.28**) comparé à la gamme de fréquences de traitement comprise entre 0 et 1000 Hz (**Figure 11.27**).
- Étude par rapport à la profondeur des défauts : La détection est plus précise en utilisant la gamme de fréquence de traitement comprise entre 0 et 2000 Hz (**Figure 11.44**) comparé à la gamme de fréquences de traitement comprise entre 0 et 1000 Hz (**Figure 11.43**).
- Étude par rapport à une dalle à multi-défauts : la détection est plus précise en utilisant la gamme de fréquences de traitement comprise entre 0 et 2000 Hz (**Figure 11.64**) comparé à la gamme de fréquence de traitement comprise entre 0 et 1000 Hz (**Figure 11.3**).

## 11.5 Conclusion

L'étude paramétrique a conduit aux conclusions suivantes :

### ➤ La nature de la source d'excitation

Le choix de la source est important. Les sources de hautes fréquences permettent la détection et la localisation des défauts de petite taille. Les défauts de grande taille sont bien adaptés aux sources de basses fréquences.

Un marteau muni d'un embout en PVC, source de basses fréquences (gamme de fréquences comprise entre 0 et 1200 Hz) ne permet pas la détection précise des défauts de taille inférieure à 50 cm \* 50 cm. L'approche conventionnelle et l'approche dite « arithmétique » ne parviennent pas à détecter ces défauts en utilisant cette source. L'approche d'analyse développée parvient à détecter ce type de défauts, mais ne permet pas d'estimer leurs profondeurs. Les modes de vibrations associés à ce type de défauts se situent au-dessus de 1000 Hz.

Par contre, avec un marteau muni d'un embout en aluminium ou en acier inoxydable (gammes de fréquences respectives entre 0 et 3000 Hz, 0 et 4000 Hz), les défauts de petite taille sont aussi bien détectables avec l'approche d'analyse développée qu'avec l'approche conventionnelle, mais aussi avec l'approche « arithmétique ». L'approche développée parvient même à estimer la profondeur des défauts.

#### ➤ **Cas des dalles armées**

Les barres d'armature en acier augmentent la rigidité des structures en béton. Les défauts de petite taille inférieure à 50 cm \* 50 cm de diamètre même situés à de faibles profondeurs (5 cm par exemple) sont difficilement détectables. Les approches conventionnelles et « arithmétique », dont les traitements se font entre 0 et 1000 Hz ne permettent pas la détection des défauts dans les dalles armées. L'approche développée parvient à détecter les défauts, mais ne parvient pas à estimer leurs profondeurs. En augmentant la rigidité de la dalle, la dalle avec de telles dimensions des défauts a tendance à se comporter comme une dalle saine. Il y a ainsi une interférence de modes de vibrations entre ceux associés au défaut et les autres composantes de la dalle. Les modes sont donc des modes globaux et ne peuvent pas être utilisés pour la caractérisation des paramètres de tels défauts.

#### ➤ **La profondeur des défauts**

La profondeur a un effet sur la détection des défauts notamment des défauts de petite taille (taille inférieure à 20 cm \* 20 cm) et de petite ouverture (inférieure à l'ordre du millimètre). De tels défauts à 15 cm de profondeur sont difficilement détectables. Les approches conventionnelles et « arithmétique » ne permettent pas la détection de tels défauts à de telles profondeurs sauf le cas des défauts de grande taille. L'approche d'analyse développée parvient uniquement à les

détecter à partir des différentes fréquences de vibration. Cependant, l'estimation de la profondeur n'est pas possible pour de tels défauts. En effet, plus la profondeur des défauts augmente, plus les modes locaux associés à ces défauts (servant à estimer la profondeur selon l'approche développée) interfèrent avec les modes des autres composantes pour former uniquement des modes globaux. L'estimation de la profondeur des défauts ne peut donc être faite pour des défauts de petite taille.

### ➤ Les effets de bords

L'effet de bord influe sur la capacité des méthodes de traitement à détecter et à caractériser les défauts. Les modes associés à la vibration des bordures d'une structure interfèrent avec les modes locaux associés à la vibration des défauts ce qui rend difficile la détection et la caractérisation notamment de défauts de petite taille. Ainsi, la suppression des points de mesures sur les bordures des structures permet de détecter mieux les défauts notamment situés au centre des dalles. On peut ainsi obtenir les modes locaux de ces défauts et par la suite envisager l'estimation de la profondeur des défauts par l'approche développée.

### ➤ La position des défauts et le nombre de défauts

La position d'un défaut dans la dalle affecte très peu la détection. Quelle que soit sa position donnée dans la dalle, il est toujours détectable. Leur fréquence propre de vibration ne change pas considérablement d'une position à une autre. Nous avons vu que le défaut de dimensions 40 cm \* 40 cm \* 0,19 mm placé au centre de la dalle (dalle N° 2) a une fréquence propre de 1560 Hz (**Figure XI.11**). Ce même défaut excentré et associé à d'autres défauts dans la dalle (dalle N° 5) a une fréquence propre de 1470 Hz (**Figure XI.61**). Sa fréquence propre diminue du fait de son interaction avec d'autres défauts. Cela montre aussi que la dalle N° 5 (constituée de 7 défauts) est plus problématique que la dalle N° 2 (constitué d'un seul défaut).

Les défauts dans une dalle caractérisée par plusieurs types de défauts peuvent être détectables en fonction de leur taille. La position du défaut et l'état de dégradation des structures (dalles à multi-défauts) n'affectent pas considérablement la fréquence de vibration des défauts et donc la réponse dynamique. L'étude paramétrique a permis de montrer les limites de chaque méthode

de traitement ou technique d'auscultation dans la détection et la caractérisation des défauts de décollements :

- **L'approche développée** permet la détection des défauts de petite taille (diamètre inférieur ou égal à 40 cm \* 40 cm et d'ouverture inférieure de l'ordre du millimètre) mais ne permet pas d'estimer leur profondeur lorsque :
  - La source utilisée lors des mesures est une source de basse fréquence ;
  - La profondeur des défauts est supérieure ou égale à 15 cm ;
  - Les dalles sont armées ;
  - L'effet de bord est pris en compte lors du traitement des données ;
  - Lorsqu'une dalle est de petite taille et affectée par plusieurs défauts.
- **Les approches conventionnelles et « arithmétique »** sont limitées en termes de détection des défauts de petite taille si les traitements se font dans les gammes de fréquences entre 0 et 800 Hz, voire entre 0 et 1000 Hz. Si on augmente la gamme de fréquences de traitement, la détection de ces défauts devient plus précise.
- **La méthode de GPR** parvient à détecter les barres armature et à déterminer leurs profondeurs dans la dalle. Mais elle ne parvient pas à détecter les défauts :
  - D'épaisseur ou d'ouverture inférieure à l'ordre du millimètre. Donc la méthode GPR ne permet pas de détecter la phase initiale de la perte d'adhérence (ouverture égale à 0,05 mm) et le début de la phase problématique du décollement (ouverture égale à 0,20 mm).
- **La méthode d'essai sonique** permet la détection des défauts, notamment les défauts de grande taille. Pour arriver à mieux détecter les défauts notamment de petite taille, la distance entre deux points de mesure doit être petite (inférieure à 10 cm). La technique est plus pratique pour des mesures sur de petites surfaces et d'accès facile aux deux faces de la structure à ausculter.

Le Tableau 11.6 représente le tableau récapitulatif de la détection et de la caractérisation des défauts étudiés en fonction des techniques d'auscultation. De toutes les méthodes utilisées dans le programme expérimental développé dans cette thèse, l'approche développée de la RI est de loin un meilleur outil pour la détection et l'évaluation des paramètres des défauts dans les dalles de béton.

Tableau 11.6 : Tableau récapitulatif des méthodes d'auscultation : Avantages et limites.

Détection et caractéristiques des défauts		Les méthodes d'auscultation non destructives utilisées					
		Approche développée de la RI	Approche conventionnelle de la RI	Approche dite « Arithmétique »	Thermographie infrarouge	Essai sonique	GPR
Détection par rapport à la taille des défauts	5 cm	NON	NON	NON	OUI	OUI	NON
	10 cm	NON	NON	NON	OUI	OUI	NON
	15 cm	NON	NON	NON	OUI	OUI	OUI
	20 cm	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	OUI
	30 cm	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	OUI
	40 cm	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	OUI
	60 cm	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
	80 cm	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
Détection par rapport à la profondeur des défauts	5 cm	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
	15 cm	OUI	OUI	OUI	NON	OUI	OUI
Détection par rapport à l'épaisseur des défauts	2 mm	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
	0,28 mm	OUI	OUI	OUI	NON	OUI	NON
	0,19 mm	OUI	OUI	OUI	NON	OUI	NON

## CHAPITRE 12

# CONCLUSIONS GÉNÉRALES, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

Les ingénieurs cherchent depuis longtemps à développer des méthodes d'auscultation pour la cartographie des défauts d'interface à l'origine de la perte de l'adhérence entre deux matériaux dans des systèmes de réparation ou structures anciennes affectées par des dégradations telles que les fissurations, les vides, le délaminage du béton, la corrosion des barres d'armature, etc.

### 12.1 Conclusions générales

La méthode de la Réponse Impulsionnelle vibratoire aux basses fréquences [0 - 1000 Hz] (ASTM 1740) est l'une des méthodes non destructives parmi les plus prometteuses et la mieux adaptée pour la détection et la caractérisation de l'étendue des défauts (les microfissurations, les vides, les nids d'abeille, etc.). Elle est utilisée pour l'évaluation de la consolidation du béton, du délaminage du béton ainsi que pour l'évaluation de la perte de capacité de support des dalles, principaux facteurs qui contribuent à la perte de la rigidité précoce des dalles de béton.

Cependant, l'approche de traitement fournie par la méthode de la RI conventionnelle ne permet pas de déterminer la taille ou l'épaisseur des défauts et d'en évaluer la profondeur dans le cas des plaques minces (dalles des tabliers de ponts, de chaussées, etc.). Aussi, les résultats de la RI peuvent être affectés par plusieurs facteurs tels que le module d'élasticité, les dimensions de la dalle, les dimensions du défaut, la profondeur du défaut, la position du point d'impact, etc. ce qui peut rendre complexe l'analyse des résultats. L'analyse et l'interprétation des données reposent encore sur les lois empiriques décrites dans la norme ASTM C1740 [23].

Dans ce programme de thèse, nous avons proposé une autre approche de traitement pour l'analyse des données de la RI. Une approche dont l'originalité repose sur la détection et surtout sur la caractérisation des défauts à l'origine des décollements dans les structures de dalles minces.

L'approche innovante proposée basée sur une combinaison de l'analyse modale et l'analyse de la réponse forcée ou de la réponse impulsionnelle.

En effet, l'analyse modale par éléments finis (Comsol MultiPhysics) a permis de montrer que, pour une dalle de béton en vibration avec un défaut :

- Il existe des modes locaux et des modes globaux associés à leurs fréquences propres de vibration respectives : voir les résultats obtenus à partir des modèles numériques (**Figures 7.1, 2, 3**) ;
- Les modes de vibration locaux sont associés à la vibration locale (défauts) ;
- Les modes de vibration globaux sont associés à la vibration de l'ensemble de la structure (Dalle, poutres, défauts, barres d'armature, etc.) ;
- En combinant les études modales et RI, nous avons montré qu'il existait une corrélation entre les deux études : les résultats obtenus à partir des modèles numériques (**Figures 7.4, 5, 6**) ;
- Les fréquences de résonance sur la courbe de mobilité correspondent aux fréquences propres de vibration (locales et globales) ;
- Les différents modes propres (mode 1, 2, etc.) ainsi que leurs fréquences propres de vibration du défaut sont détectables.

L'approche a ainsi permis de montrer, grâce aux programmes numérique et expérimental développés, sa pertinence à détecter, à estimer le diamètre et la profondeur des défauts.

L'approche développée vise ainsi à définir les paramètres de conception d'un système d'inspection acoustique entre deux dalles de béton. Les résultats attendus sont les cartographies de la détection et de l'estimation des paramètres du défaut (largeur et profondeur du défaut).

Pour ce faire, nous avons implanté l'approche d'analyse à travers un programme informatique sur Matlab à partir des données issues de chaque point de mesure de la structure :

- Le programme développé consiste à discriminer les modes de vibration globaux des modes de vibration locaux associés à la vibration du défaut afin de construire des cartographies de détection en fonction de leurs fréquences propres de vibration.



- Les cartographies donnent des informations sur l'étendue du défaut et donc sur ses dimensions (largeur, diamètre). Puis, connaissant la fréquence vibratoire propre du défaut et la surface du défaut, on est en mesure d'estimer sa profondeur en utilisant l'équation de vibration en flexion des plaques minces (**Équation 6.1**).

Le choix des paramètres de conception de l'approche définie (le seuil de détection des pics, le paramètre de résolution, le paramètre d'émergence et le paramètre d'affichage) est essentiel pour arriver à des résultats pertinents en termes de détection et de caractérisation des défauts. Le choix des paramètres d'analyse varie en fonction de la nature du défaut, de sa position, son diamètre, sa profondeur, etc.

Pour simplifier l'analyse des données à partir de l'approche développée, il est essentiel de fixer à priori les paramètres d'analyse tels que le seuil de détection des pics, le paramètre de résolution, le seuil d'affichage d'image et de faire varier uniquement le paramètre d'émergence des modes de vibration. Le paramètre d'émergence est intéressant, car il permet d'afficher les modes globaux et surtout les modes locaux qui permettent une meilleure détection des défauts et leur caractérisation.

L'étude paramétrique d'un système de conception de la perte de l'adhérence entre deux dalle, numérique et expérimentale a permis de montrer que l'approche développée permet de détecter et d'estimer la profondeur les défauts dont :

- La dimension ou la taille est supérieure à 20 cm \* 20 cm ;
- L'ouverture ou épaisseur inférieure à l'ordre du millimètre, le type de défauts responsables de la perte d'adhérence dans les dalles de béton ;
- La profondeur est inférieure à 15 cm dans la dalle ;
- La dimension ou taille est inférieure ou égale à 40 cm \* 40 cm lorsque la source d'excitation utilisée est une source ayant une gamme de fréquences comprise entre 0 et 3000 ou 4000 Hz, car les fréquences propres associées à la vibration de ces défauts se trouvent au-delà de 1000 Hz ;
- La dimension ou taille est supérieure à 20 cm \* 20 cm dans les dalles armées. Les barres d'armature augmentent la rigidité des structures et réduisent la capacité de détection des petits défauts ;

- La dimension ou taille est inférieure ou égale à 40 cm \* 40 cm lorsque les effets de bords sont négligés. En effet, la mobilité est plus élevée aux bords et aux coins de la dalle même en absence des vides et plus faible au centre de la dalle. Cette variation de la flexibilité introduit une large ambiguïté dans l'interprétation des résultats de la méthode de la RI notamment pour la détection des défauts de petite taille situés aux bords ou aux coins des dalles. La flexibilité mesurée sur les bords et coins de la dalle peut être jusqu'à six fois supérieure à celle mesurée au centre [45] ;
- La dimension ou le diamètre est supérieur à 20 cm \* 20 cm lorsque ceux-ci se trouvent dans une structure affectée par plusieurs défauts.

Les autres méthodes d'analyse ou méthodes d'auscultation ont montré des limites à évaluer les défauts responsables de la perte de l'adhérence :

- **L'approche conventionnelle** permet de détecter que les défauts dont le diamètre fait au moins deux fois l'épaisseur de la dalle [45]. Cela suppose que si une dalle a une épaisseur égale à 20 cm, le diamètre minimum du défaut qui peut être détecté est de 40 cm. Nous avons pu le vérifier. (**Annexe A.1, Figures A.4, 9**). Le défaut de 40 cm diamètre est détecté, mais pas avec précision. Ceci s'explique par le fait que la gamme de fréquence de traitement est comprise entre 0 et 800 ou 1000 Hz. Nous avons vu d'après l'étude modale que la fréquence propre de ce type de défaut est entre 1400 - 1600 Hz. Donc il est tout à fait normal que la détection de ce défaut et tous les défauts dont le diamètre est inférieur ou égal à 50 cm ne soient pas détectables en utilisant l'approche conventionnelle. En travaillant ainsi dans la gamme de fréquences entre 0 et 2000 Hz, on voit que la détection est possible. (**Annexe A.1, Figures A.9, 10**).
- **L'approche dite « arithmétique »** proposée dans cette thèse est très intéressante, car les résultats (mobilité moyenne calculée) et les conclusions sont très proches de ceux obtenus par l'approche conventionnelle.
- **La méthode de thermographie infrarouge** n'a pu détecter que le défaut de la dalle N°1 situé à 5 cm de profondeur et d'épaisseur égale à 2 mm (**Annexe B.1, Figure B.6**). C'est donc une méthode limitée pour la détection des défauts de profondeur et d'ouverture inférieure au millimètre.

- **La méthode d'essai sonique** détecte les défauts associés à la perte d'adhérence dans les systèmes bi-couches. Son inconvénient réside dans la pratique. La configuration des mesures par le mode de transmission est impossible lorsqu'on n'a pas accès aux deux faces de la structure à ausculter.
- **La méthode GPR** est limitée dans la détection et la localisation des défauts d'ouverture inférieure au millimètre. Elle n'a pu détecter et évaluer la profondeur que le défaut de 2 mm d'épaisseur situé à 5 cm de profondeur (Dalle N° 1) (**Annexe B.1, Figures B.9, 10**). Ce même défaut à 15 cm de profondeur n'a pas pu être détecté. Cette méthode est plus adaptée à l'auscultation de grandes structures (barres d'armature) ou anomalies (vides) dans le béton.

## 12.2 Recommandations et perspectives

L'approche d'analyse des données de la RI développée est donc un bel outil d'analyse pour l'évaluation de la perte d'adhérence. Elle permet à partir des fréquences propres de vibration de détecter les défauts, estimer leur diamètre et leur profondeur. Ses seules limites à partir des outils d'analyse d'expérimentation et numériques dont nous avons disposé résident uniquement dans l'évaluation de la profondeur des défauts dont les dimensions sont inférieures à 20 cm \* 20 cm de diamètres et dans les défauts situés au-delà de 15 cm de profondeur sous la dalle.

Les résultats sur lesquels ont été basées nos analyses sont issus des modélisations simples qui ne prennent pas en compte toutes les caractéristiques structurales (mécaniques, physique, chimiques) des ouvrages, les conditions environnementales et les activités anthropiques liées à l'action humaine (par exemple, les charges liées à la circulation automobile) qui peuvent affectées la réponse vibratoire sur la détection des défauts. Nous avons également travaillé avec un programme expérimental limité constitué des dalles de petites dimensions (110 cm \* 110 cm \* 20 cm). La réponse vibratoire est différente sur les structures de grandes dimensions. En effet, la mobilité augmente d'au moins de 20 % lorsque la longueur de la dalle est doublée [46].

Les applications de l'approche développée sur une structure réelle ont donné des résultats intéressants. Les mesures avaient été menées en vue de détecter les vides entre les blocs de granite et les murs de béton. Des travaux de carottages antérieurs effectués avaient relevé la

présence des vides sur certaines parties de l'ouvrage. La présence de ces vides a ainsi poussé les responsables de la structure à solliciter la compagnie AusculTECH Inc. en vue de réaliser une inspection détaillée au moyen des méthodes non destructives. Les méthodes qui ont été utilisées sont l'inspection au marteau, la thermographie infrarouge, le géoradar et la méthode de la RI. Les travaux ont permis d'inspecter quatre (4) murs différents. Les mesures ont été effectuées le long des lignes avec un pas de mesure 20 cm entre points. Les zones problématiques (son creux) inspectées au marteau ont été marquées par une croix (**Annexe C, Figure C.1**). Les mesures à thermographie infrarouge n'avaient pas permis de caractériser ces zones. L'approche développée avait permis de fournir des cartographies de détection. Les zones problématiques correspondent aux zones de fortes mobilités (zones en rouge sur les cartographies) (**Annexe C, Figures C.2, 3, 4, 5**). Les résultats sont donc promoteurs.

L'approche développée a permis à partir de la combinaison des analyses modales et de la RI de dissocier les modes et les fréquences propres associés à la vibration des défauts (modes locaux) et ceux associés à la vibration globale de la dalle (modes globaux). Puis, à partir des modes et des fréquences propres associées à la vibration de défaut, on pouvait caractériser le défaut (évaluation de sa taille et de sa profondeur) en utilisant l'équation fondamentale des plaques minces en flexion. L'étude de validation était basée sur des modèles numériques et expérimentaux des dalles caractérisées par des défauts simulés (vides, microfissurations, délaminage) dont la position, la taille, l'ouverture étaient connues. Quelques limites de l'approche ont été présentées. Ainsi, pour une validation effective de l'approche et pour tester davantage sa robustesse, des analyses devront être faites sur des données issues des structures réelles ou sur des études numériques plus détaillées pour mieux comprendre l'impact des paramètres de conception, tels que :

- La longueur de la dalle ;
- L'épaisseur de la dalle ;
- L'épaisseur ou l'ouverture du défaut ;
- La profondeur du défaut ;
- La densité du béton de la dalle ;
- Le module d'élasticité du béton de la dalle ;
- L'amortissement de la dalle ;

- Le contenu du défaut (air, eau gelée, ou eau liquide) ;
- La position du défaut (horizontal, vertical ou oblique) ;
- La nature de défauts (vides, microfissurations, délaminages, nids-d'abeilles, etc.) ;
- La présence des barres d'armature dans la dalle ;
- Le support de la dalle, etc.

Après la validation de l'approche développée sur des données de structures réelles et les améliorations apportées, l'outil peut évoluer en une application ou un logiciel de traitement et d'analyse des données de la RI pour l'inspection des structures de génie civil, doté d'une interface pratique, facile et accessible à tous les utilisateurs.

# LISTE DE RÉFÉRENCES

- [1] Benoît Bissonnette, Luc Courard, David W. Fowler, Jean-Louis Granju « Bonded Cement-Based Material Overlays for the Repair, the Lining or Strengthening of Slabs or Pavement », RILEM State-of the-Art Reports, Volume 3, 2011.
- [2] D.W. Fowler and M. Trevino, Overlay Design Process, RILEM State-of the-Art Reports, Volume 3, 2011.
- [3] LAURENT MOLEZ, Comportement des réparations structurales en béton : couplage des effets hydriques et mécaniques Thèse de doctorat présentée en cotutelle à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval Québec, 2003.
- [4] Fabien PEREZ, Contribution à l'étude du comportement mécanique des éléments bicouches sous sollicitations statiques et cycliques, Thèse présentée à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval, 2005.
- [5] L. Courard, M. Trevino, and B. Bissonnette, Condition Evaluation of Existing Structure Prior to Overlay, RILEM State-of the-Art Reports, Volume 3, 2011.
- [6] N. RENAULT, P. PLIYA, J-L. GALLIAS Caractérisation de l'épaisseur et du module d'élasticité du béton des dalles par des techniques acoustiques, 2013.
- [7] A. Turatsinze, H. Beushausen, R. Gagné, J-L. Granju, J. Silfwerbrand and R. Walter, Debonding, RILEM State-of the-Art Reports, Volume 3, 2011.
- [8] J. Silfwebrand, H. Beushausen and L. Courard, Bond, RILEM State-of the-Art Reports, Volume 3, 2011.
- [9] Emmons, P.H et al., Concrete repair and maintenance illustrated: problem analysis, repair strategy, techniques, 1993.
- [10] Comportement des réparations structurales en béton : couplage des effets hydriques et mécaniques Thèse de doctorat présentée en cotutelle à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval Québec, Laurent Molez, 2003.
- [11] ENI 1504-3 Products and Systems for Protection and Repair of Concrete Structures Part 3: Structural and Non-Structural Repairs.
- [12] ASTM C900 Standard Test Method for Pullout Strength of Hardened Concrete.
- [13] ASTM C805 Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete.
- [14] ASTM C803 Standard Test Method for Penetration Resistance of Hardened Concrete.
- [15] ASTM C1150 Standard Test Method for the Break-Off Number of Concrete.

- [16] Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method), C1583/C1583M – 13.
- [17] Sadowski L., (2003), « Non-destructive evaluation of the pull-off adhesion of concrete floor layers using rbf neural network », *Journal of civil engineering and management*, Volume 19(4): 550560.
- [18] Davis A. G., (1998), « Nondestructive test methods for evaluation of concrete in structures ».
- [19] ASTM D4788 Standard Test Method for Detecting Delamination in Bridges Using Infrared Thermography.
- [20] ASTM D4748 Standard Test Method for Determining the Thickness of Bound Pavement Layers using Short-Pulse Radar.
- [21] ASTM C1040 Standard Test Method for Density of Unhardened and Hardened Concrete in place by Nuclear Methods.
- [22] ASTM C876 Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.
- [23] ASTM C1740 (10), Standard Practice for Evaluating the Condition of Concrete Plates Using the Impulse-Response
- [24] Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: A review Zhongqing Su, Lin Ye, Ye Lu, 2006.
- [25] ASTM C1383 (98): Standard test method for measuring the P-wave speed and the thickness of concrete plates using the impact Echo method.
- [26] Standard Practice for Ultrasonic Pulse-Echo Straight-Beam Contact Testing, E114.
- [27] Ottosen N., S. et al, (2004), « Theoretical Interpretation of Impulse Response Tests of Embedded Concrete Structures », *Journal of engineering mechanics*, Asce.
- [28] Davis A.G., (2003), « The nondestructive impulse response test in North America: 1985–2001 », *NDT&E International*, 36 185–193.
- [29] Hudson Victor Henry Aina Jackson, Alternative rigid pavement models for the reduction of impulse response field data, PhD-2003.
- [30] Clausen J. S., Knudsen A., « Nondestructive testing of bridge decks and tunnel linings using impulse response », Ramboll Denmark A/S, dept. of Bridge Maintenance and Material Technology, Bredevej 2, DK-2830 Virum.

- [31] Gorzelanczyk T., et al, « Non-destructive evaluation of the concrete prefabricated pile length using impulse response smash », *Institute of Building Engineering*, Wroclaw University of Technology.
- [32] A. G. DAVIS, C. S. DUNN, from theory to field experience with the non-destructive vibration testing of piles, *Proceedings*, Part 7, March, 1975.
- [33] Michols K. A., et al., (2001), « Evaluating Historic Concrete Bridges », *Concrete repair bulletin*.
- [34] Kevin A. Michols, Allen G. Davis and Carlton A. Olson, Evaluating Historic Concrete Bridges, *Concrete Repair Bulletin*, Juillet/Août, 2001.
- [35] Davis, A. G. et al., (1987), « Non-destructive testing of concrete pavement slabs and floors with the transient dynamic response method », *Structural faults and repairs*, London.
- [36] Hola J. et al., (2010), « Comprehensive nondestructive way of identifying delaminations in concrete floor toppings with large surface area », *Czech Society for Nondestructive Testing*.
- [37] Reddy, S., (1992), « Improved impulse response testing: Theoretical and practical validations », *ProQuest Dissertations and Theses*.
- [38] Kruntcheva M. R. et al., (2004), « Feasibility of Assessing Bond Condition of Asphalt Concrete Layers with Dynamic Nondestructive Testing », *Journal of transportation engineering*.
- [38] Riad Al Wardany, Caractérisation non destructive des structures en béton au moyen des ondes dispersives de Rayleigh et de Lamb, Thèse de doctorat (Ph.D) ès sciences appliquées Spécialité : génie civil Sherbrooke (Québec), Canada, 2005.
- [39] <http://tpe.tsunami.voila.net/propagation.html>.
- [40] Jean-Louis Guyader, Vibrations des milieux continus, Collection acoustique, Lavoisier, 2002.
- [41] Jean Courbon, Plaques minces élastiques, Éditions Eyrolles, 1980.
- [42] Michel Cazenave, Méthode des éléments finis, Approche pratique en mécanique des structures, 2<sup>ème</sup> édition, Dunod, Paris, 2013.
- [43] Michel Cazenave, Méthode des éléments finis, Approche pratique en mécanique des structures, 1<sup>ème</sup> édition, Dunod, Paris, 2010.



- [44] Contribution à l'étude de l'auscultation des chaussées par méthode d'impact mécanique pour la détection et la caractérisation des défauts d'interface, Jean-Michel Simonin, Thèse de Doctorat, 2005.
- [45] Alternative rigid pavement models for the reduction of impulse response field data, Hudson Victor Henry Aina Jackson, PhD-2003.
- [46] Study of parameters affecting impulse response method by Soheil Nazarian and Srinivasa Reddy (Reviewed by the Highway Division), 1996.
- [47] Nazarian S. et al., (1996), « Study of parameters affecting impulse response method », *Journal of transportation engineering*, 122:308-315.
- [48] Reddy, S., (1992), « Improved impulse response testing : Theoretical and practical validations », *ProQuest Dissertations and Theses*.
- [49] Tiré de Lignes directrices pour la conception, la construction, la réfection et l'entretien d'ouvrages de stationnement durables, Travaux publics et Services gouvernementaux Canada, Mars 1994, 234 p.

## ANNEXE A

### VALIDATION NUMÉRIQUE DE L'APPROCHE DÉVELOPPÉE

#### A.1. Validation numérique de la NA, cas une dalle avec défaut

#### Étude par rapport à la nature de la source d'excitation : Gamme des fréquences

Tableau A. 1 : Dimensions et Caractéristiques des matériaux.

Dimensions de la dalle (mm * mm * mm)	Dimensions du défaut (mm * mm * mm)	Profondeur du défaut sous la dalle (cm)	Module d'élasticité de la dalle (GPa)	Densité de la dalle (kg/m <sup>3</sup> )	Coefficient de Poisson de la dalle
4000 * 2000 * 200	400 * 400 * 0.2	5	30	2500	0,2

## Résultats : Cas 1 - Fréquence d'excitation = 1000 Hz

### ➤ Résultats : Approche développée et analyse des paramètres

#### • Résultats d'analyse : Cartographies pour la détection

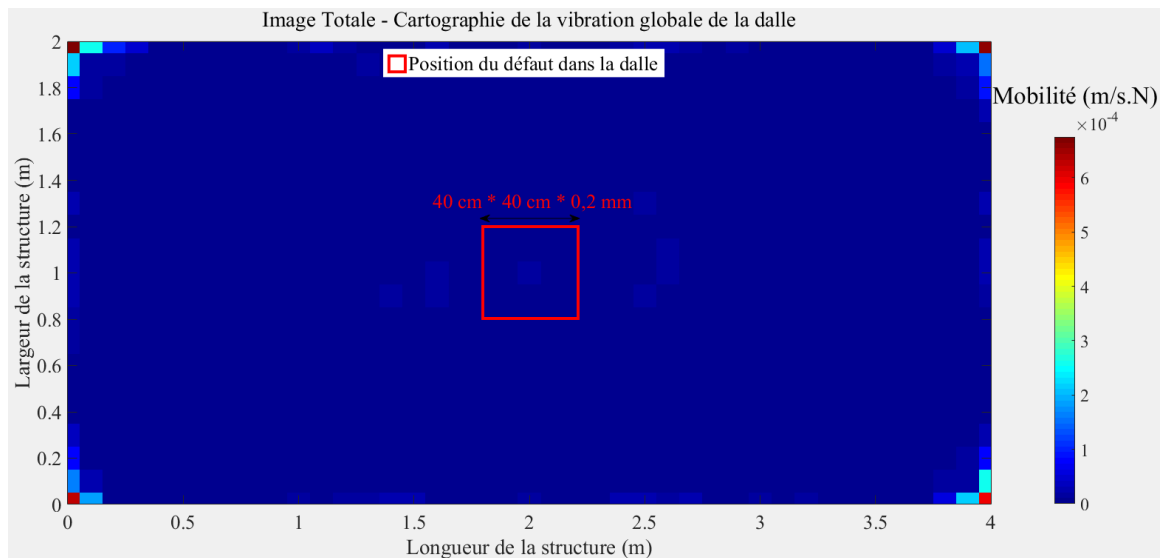


Figure A. 1 : Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection  
Cartographie de la vibration globale de la dalle.

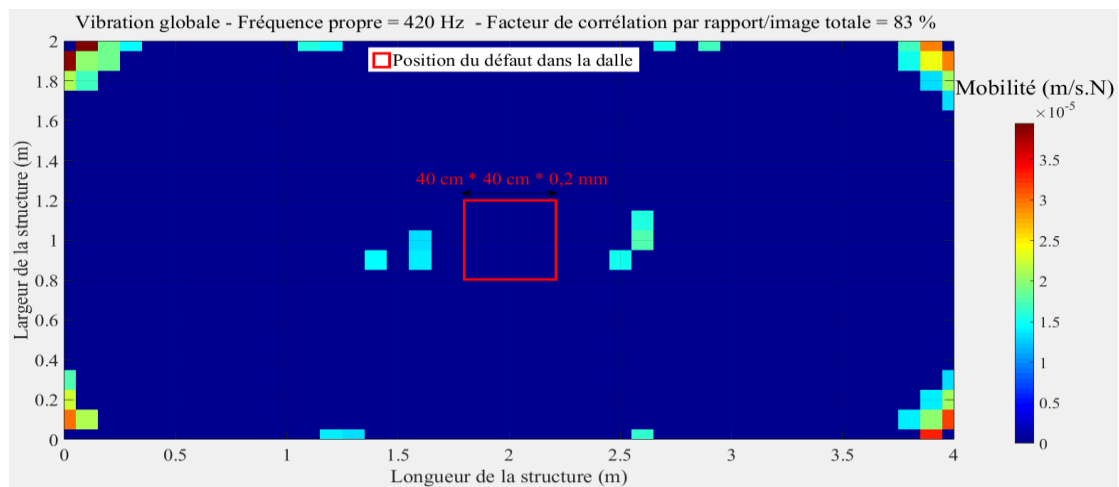


Figure A. 2 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection - Fréquence propre  
de vibration de 420 Hz.

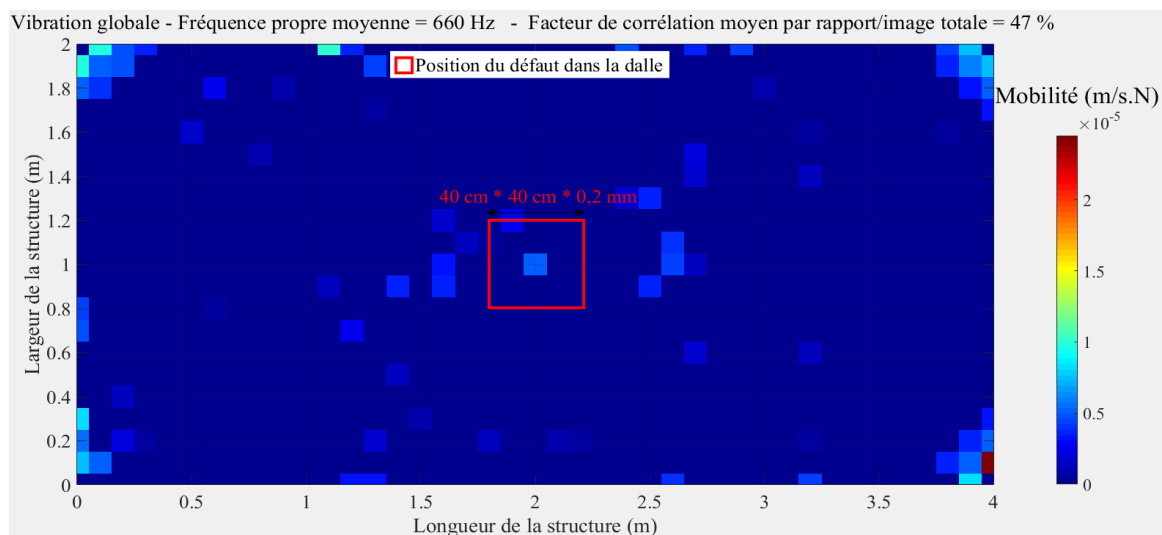


Figure A. 3 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection - Fréquence propre de vibration de 660 Hz.

### ➤ Résultats : Approche conventionnelle

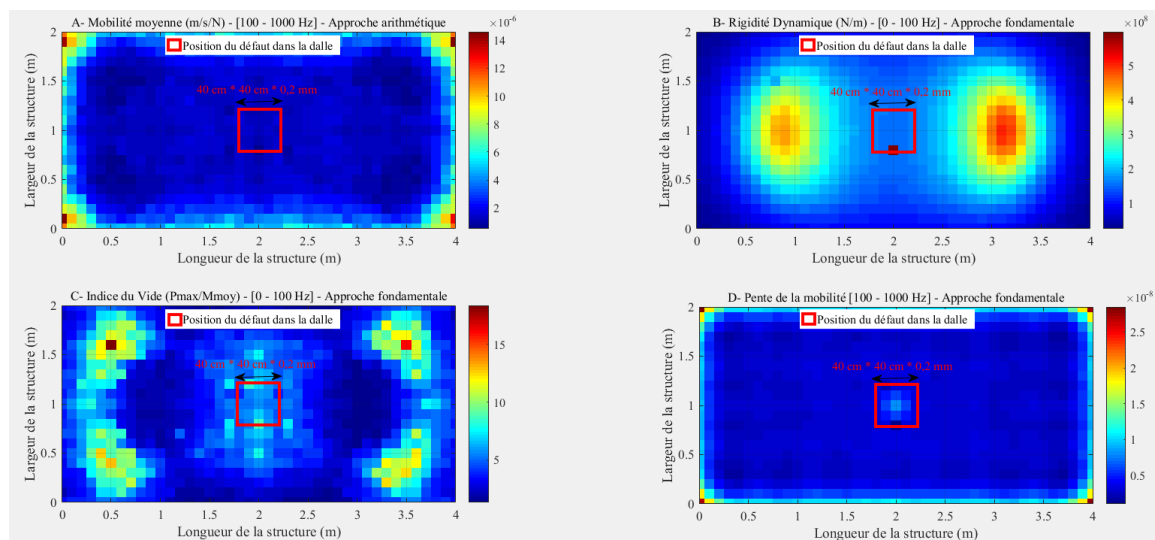


Figure A. 4 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes – B : Rigidité dynamique – C : Indice du vide – D : Pente de la mobilité.

➤ **Résultats : Approche « arithmétique » – Mobilité moyenne**

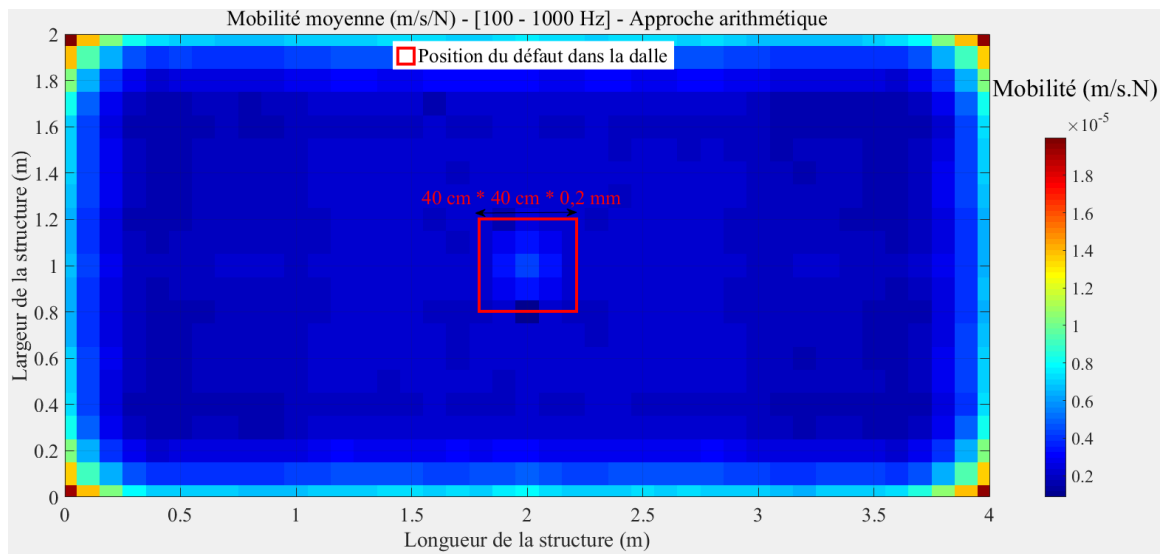


Figure A. 5 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes.

**Résultats : Cas 2 - Fréquence d'excitation = 2000 Hz**

➤ **Résultats : Analyse modale**

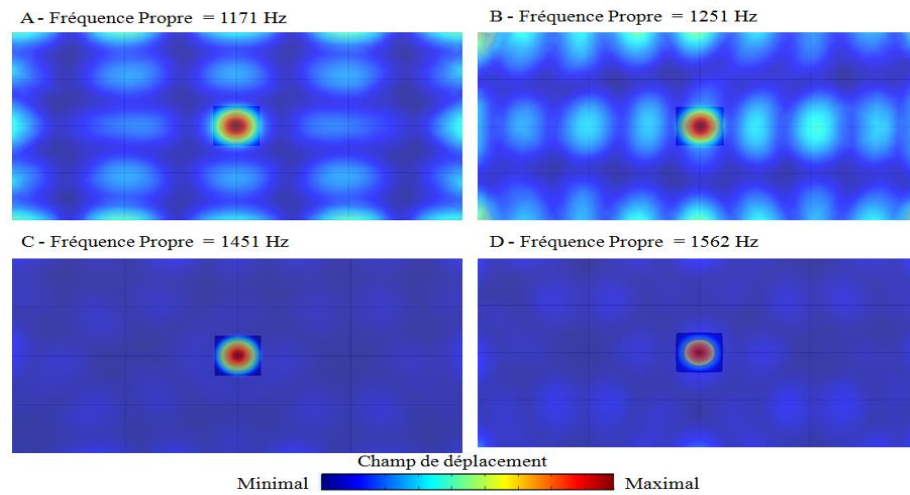


Figure A. 6 : Analyse modale – Cartographie des modes propres.

➤ **Résultats : Approche développée et analyse des paramètres**

- **Résultats d'analyse : Cartographie pour la détection**

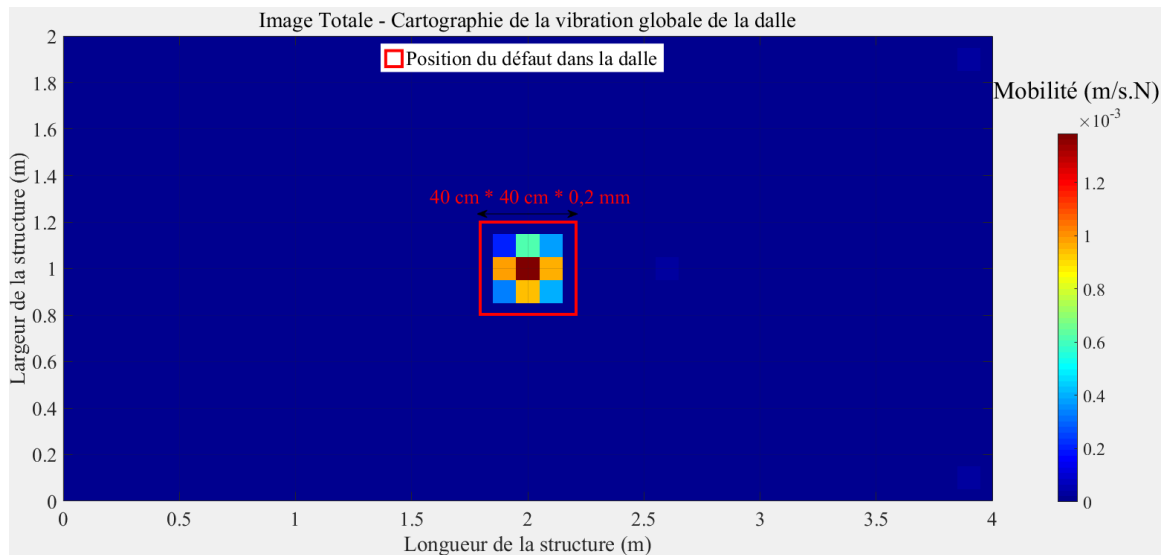


Figure A. 7 : Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection  
Cartographie de la vibration globale de la dalle.

- **Résultats d'analyse : Cartographies pour l'estimation du diamètre et la profondeur du défaut**

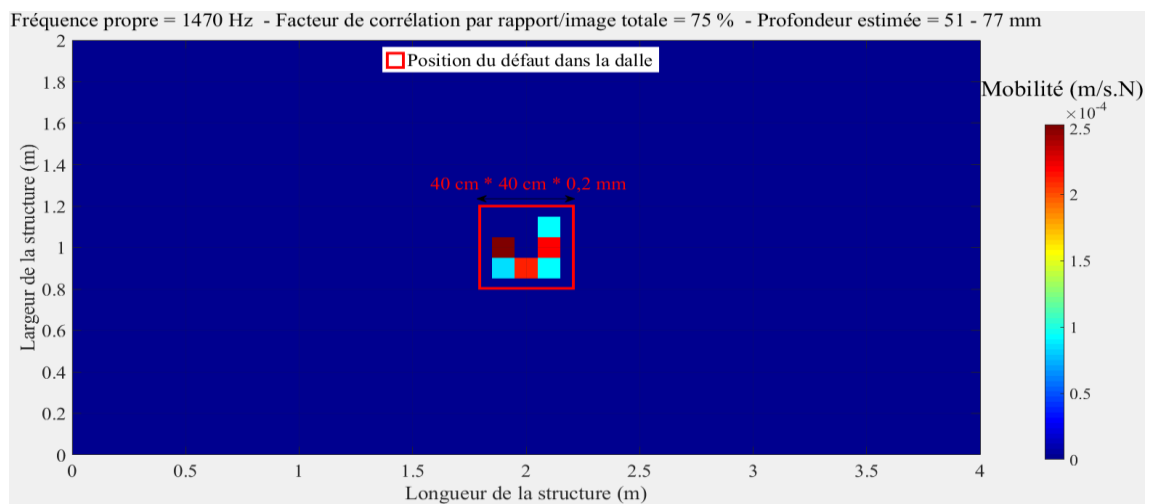


Figure A. 8 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour l'estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 1470 Hz (mode 1).

## ➤ Résultats : Approche conventionnelle

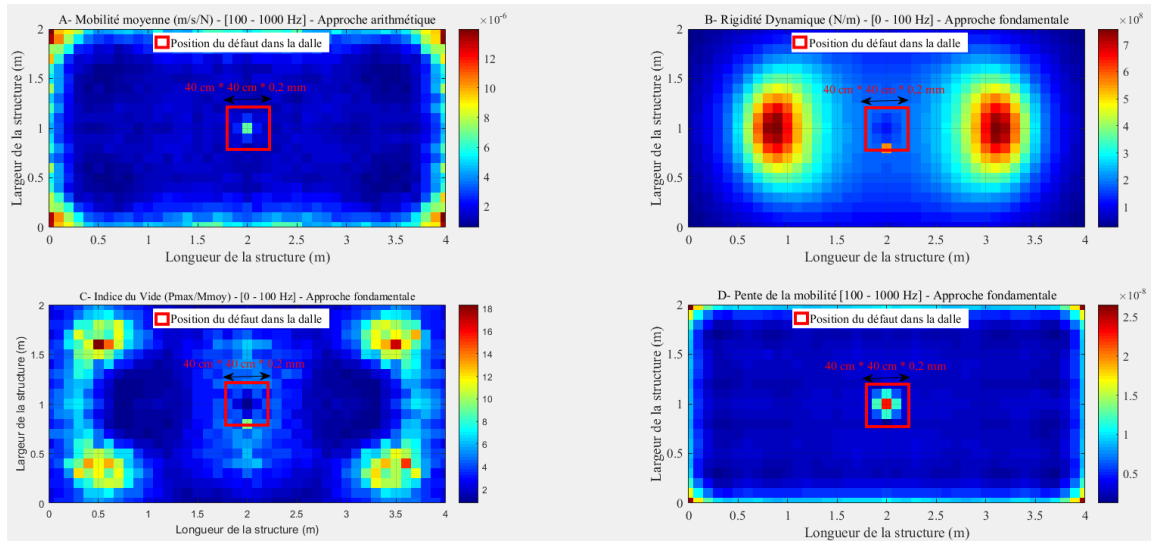


Figure A. 9 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes – B : Rigidité dynamique – C : Indice du vide – D : Pente de la mobilité.

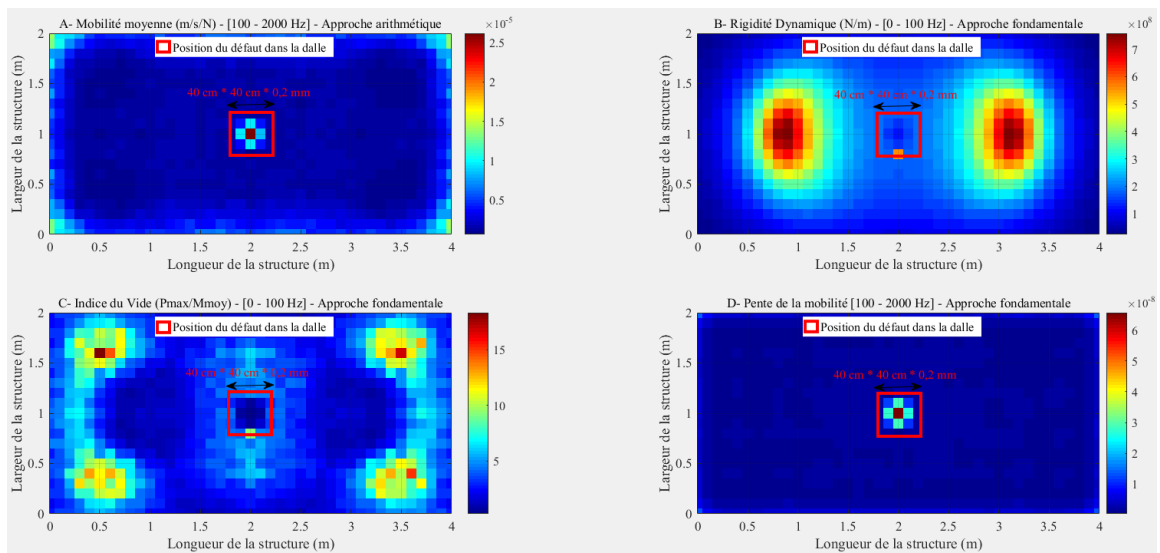


Figure A. 10 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes – B : Rigidité dynamique – C : Indice du vide – D : Pente de la mobilité.

➤ **Résultats : « Approche arithmétique » – Mobilité moyenne**

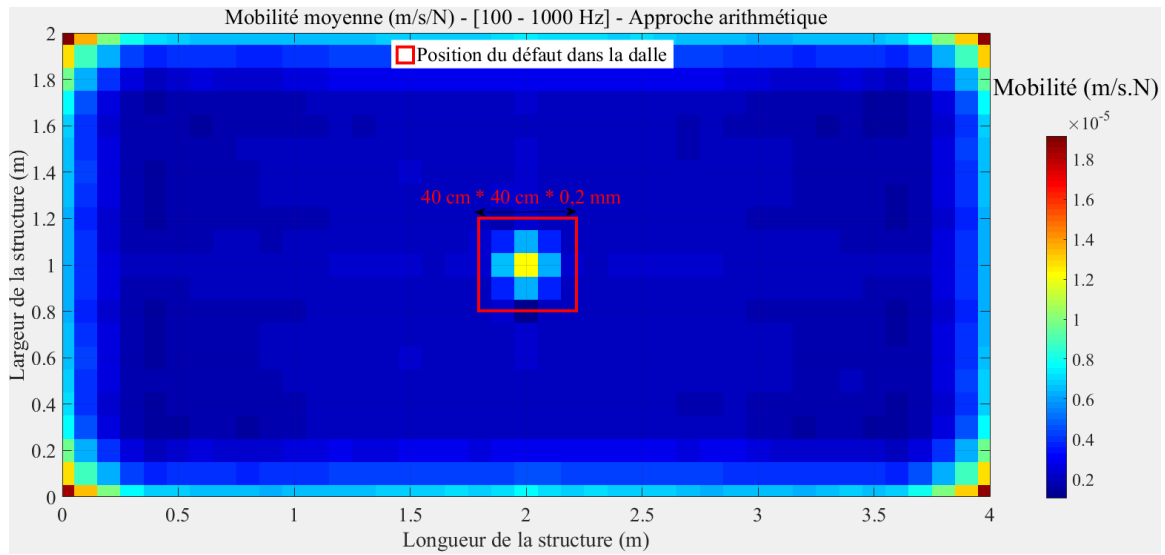


Figure A. 11 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes.

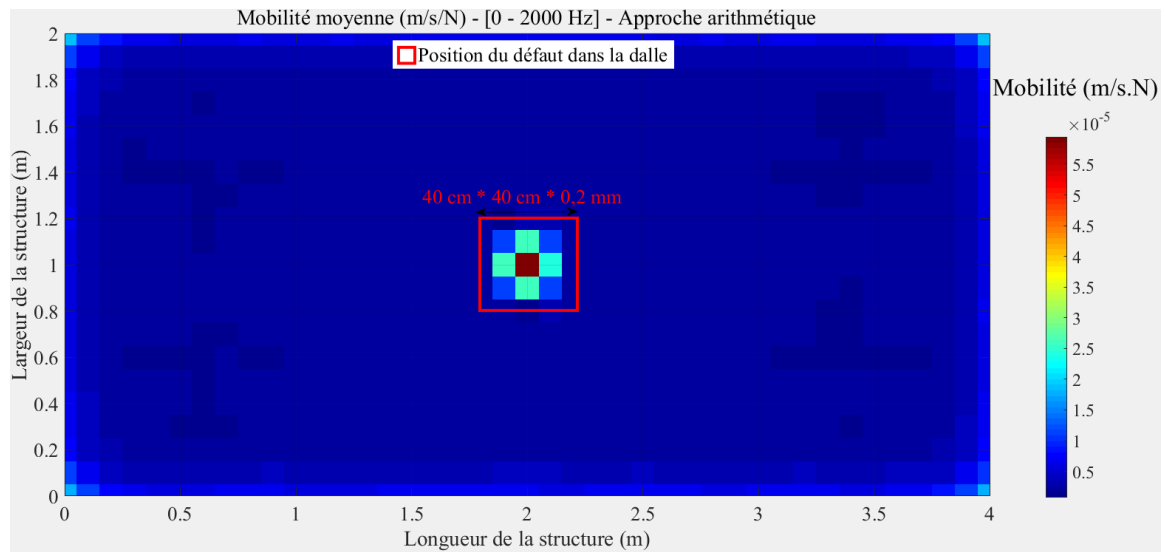


Figure A. 12 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes.



## A.2. Validation numérique de la NA, cas une dalle avec défaut Étude par rapport à la position du défaut dans la dalle

Tableau A. 2 : Dimensions et Caractéristiques des matériaux.

Dimensions de la dalle (mm * mm * mm)	Dimensions du défaut (mm * mm * mm)	Profondeur du défaut sous la dalle (cm)	Module d'élasticité de la dalle (GPa)	Densité de la dalle (kg/m <sup>3</sup> )	Coefficient de Poisson de la dalle
4000 * 2000 * 200	1800 * 1800 * 0.2	5	30	2500	0,2

### Cas 1 - Dalle avec un défaut excentré

#### ➤ Résultats : Approche développée et analyse des paramètres

##### • Résultats d'analyse : Cartographie pour la détection

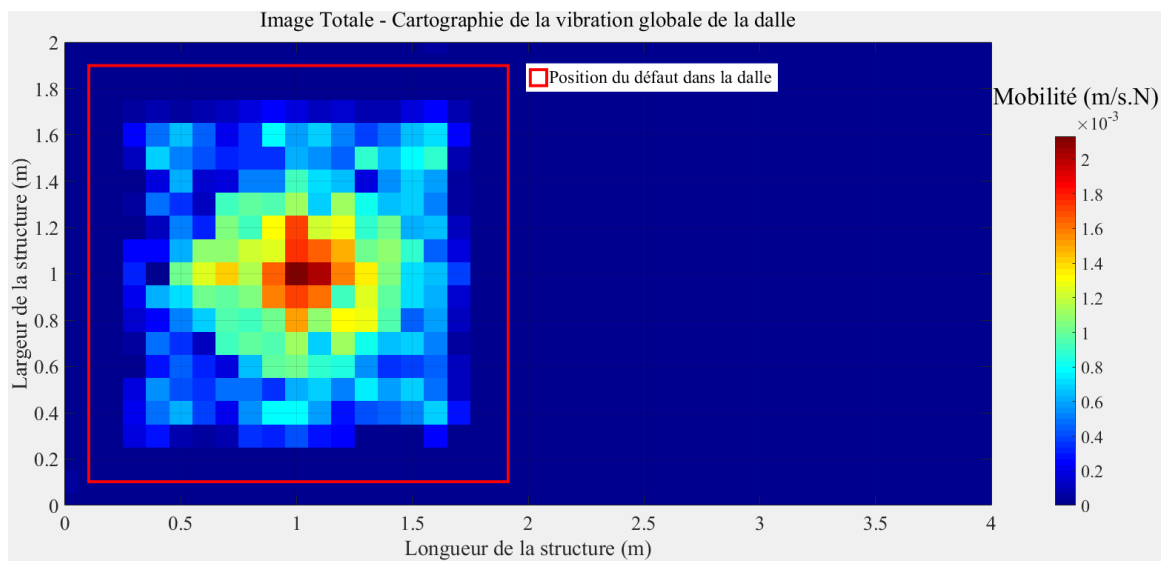


Figure A. 13 : Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection  
Cartographie de la vibration globale de la dalle.

- **Résultats d'analyse : Cartographie pour l'estimation du diamètre et la profondeur du défaut**

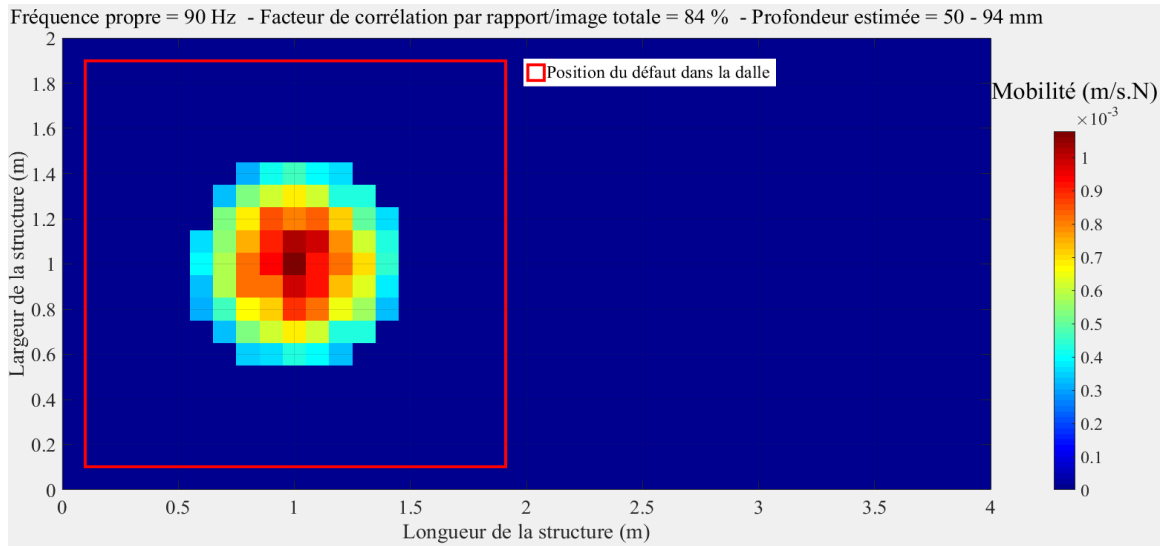


Figure A. 14 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour l'estimation du diamètre et la profondeur du défaut – Fréquence propre de vibration de 90 Hz (mode 1).

➤ **Résultats : Approche conventionnelle**

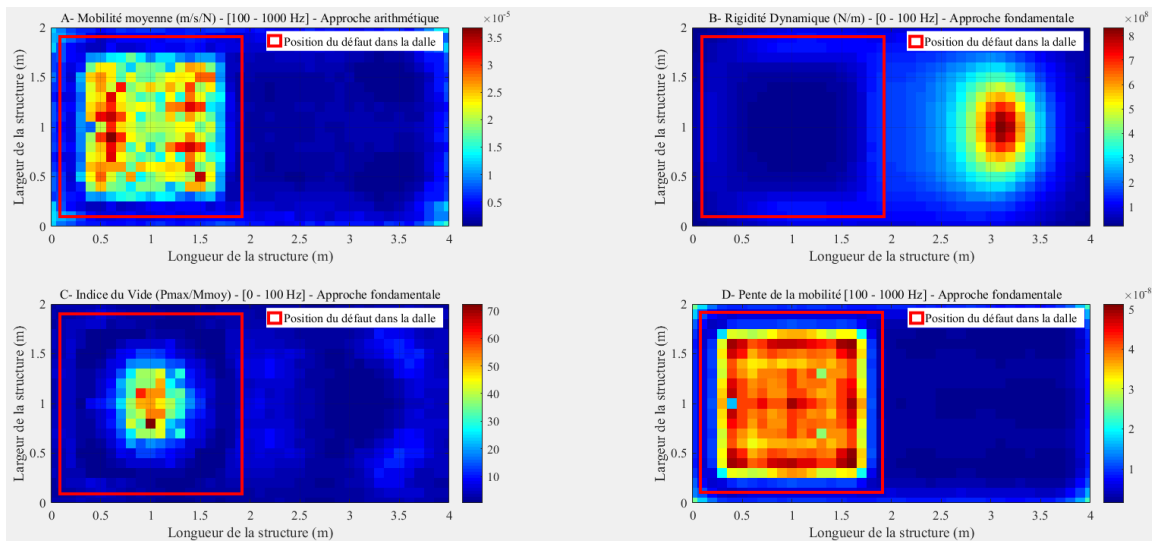


Figure A. 15 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes – B : Rigidité dynamique – C : Indice du vide – D : Pente de la mobilité.

➤ **Résultats : Approche « arithmétique » – Mobilité moyenne**

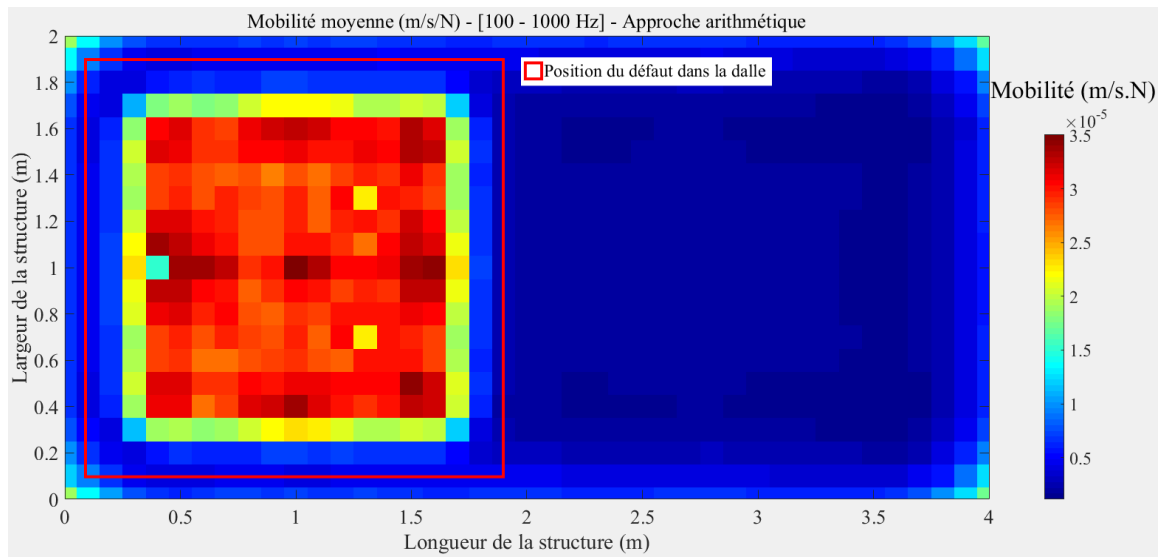


Figure A. 16 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes.

### A.3. Validation numérique de la NA, cas une dalle avec défaut

#### Étude par rapport à une structure à multi-défauts

Tableau A. 3 : Dimensions et Caractéristiques des matériaux.

Dimensions de la dalle (mm * mm * mm)	Dimensions des défauts (mm * mm * mm)	Profondeur des défauts sous la dalle (cm)	Module d'élasticité de la dalle (GPa)	Densité de la dalle (kg/m <sup>3</sup> )	Coefficient de Poisson de la dalle
4000 * 2000 * 200	600 * 600 * 0.2	5	30	2500	0,2
	1000 * 1000 * 0.2				
	800 * 800 * 0.2				

➤ **Résultats : Analyse modale**

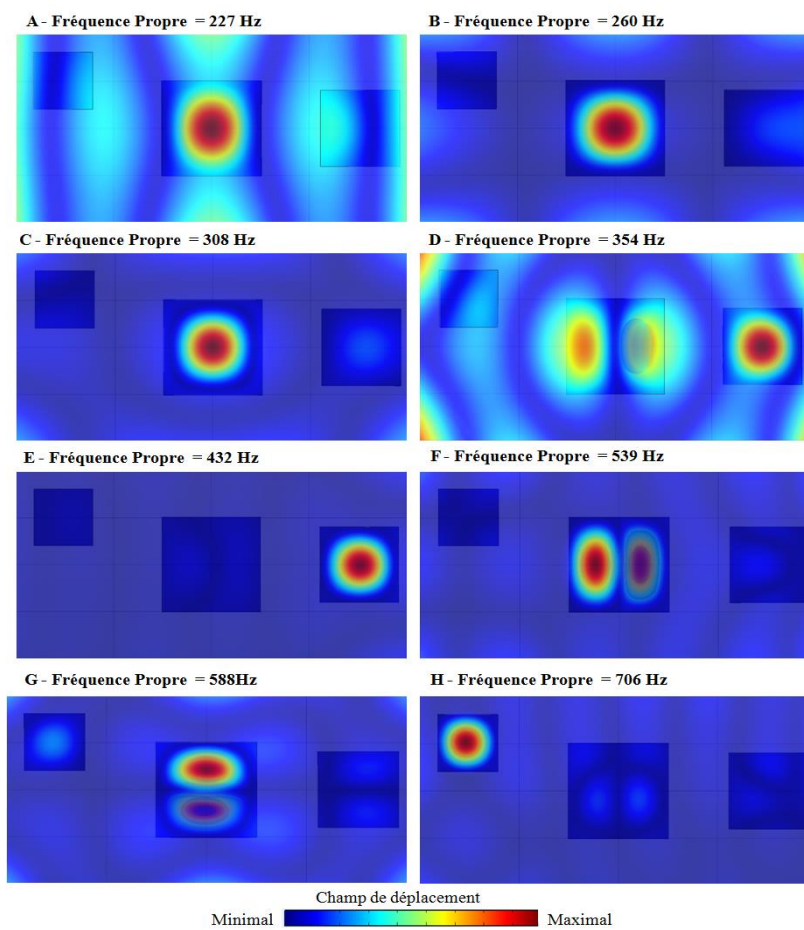


Figure A. 17 : Analyse modale – Cartographie des modes propres.

➤ **Résultats : Approche développée et analyse des paramètres**

• **Résultats d'analyse : Cartographies pour la détection**

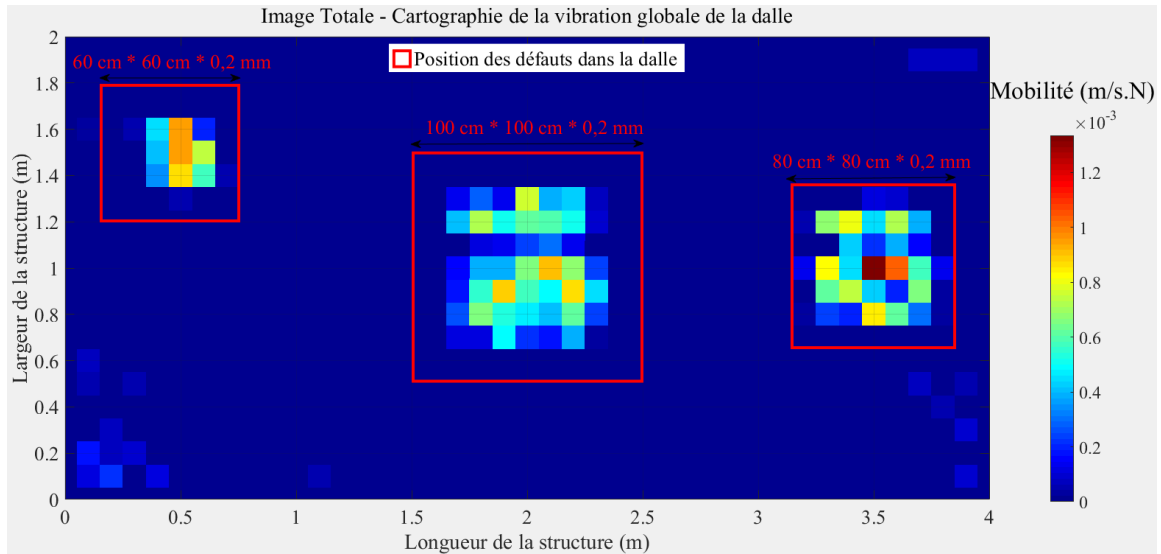


Figure A. 18 : Cartographie des mobilités moyennes – Cartographie pour la détection  
Cartographie de la vibration globale de la dalle.

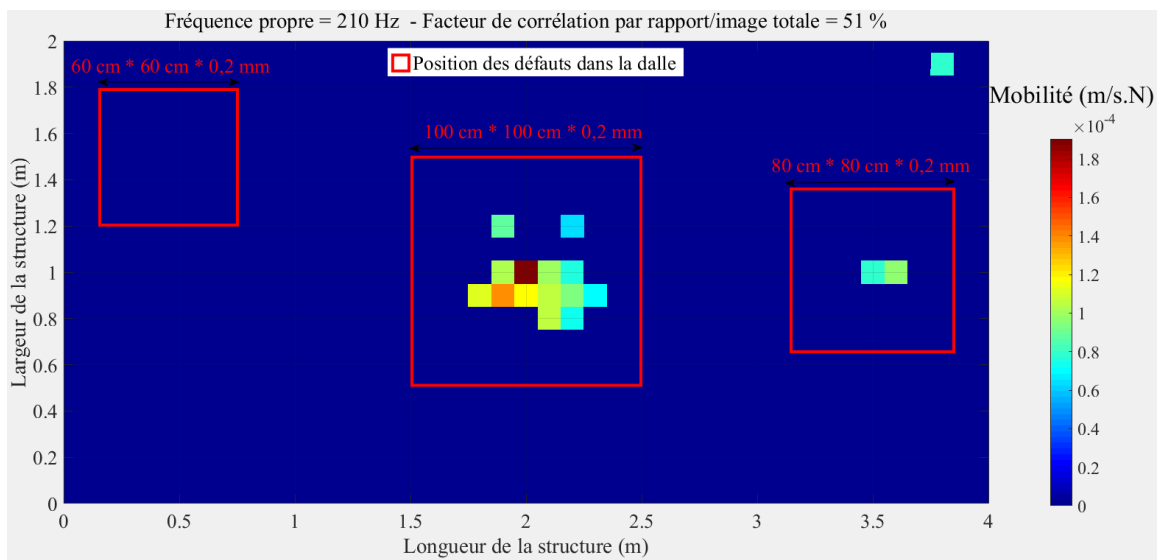


Figure A. 19 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection - Fréquence propre  
de vibration de 220 Hz.

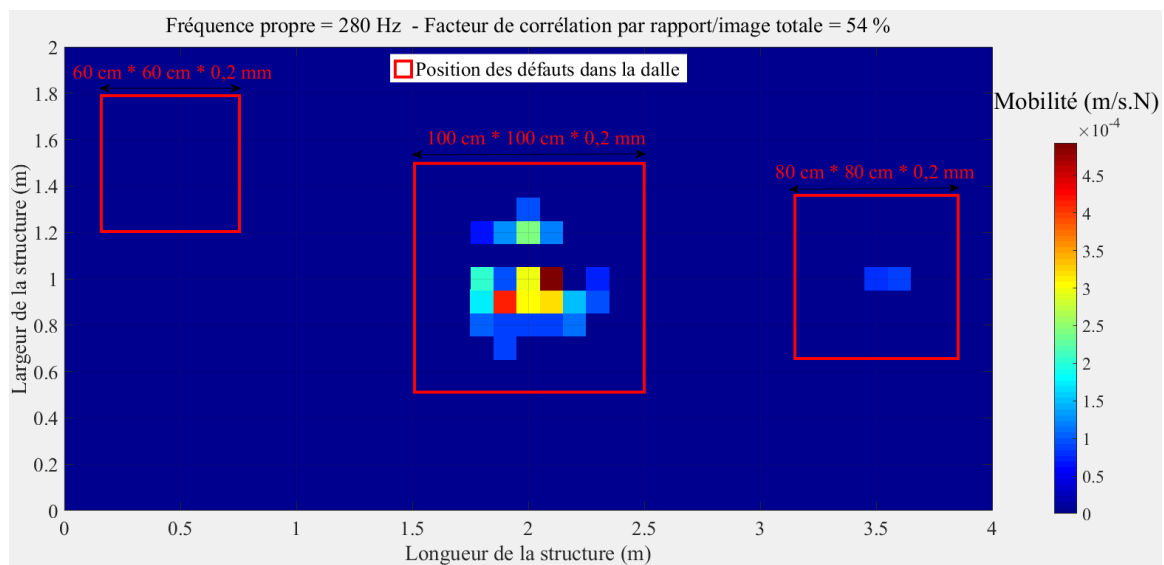


Figure A. 20 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection - Fréquence propre de vibration de 280 Hz.

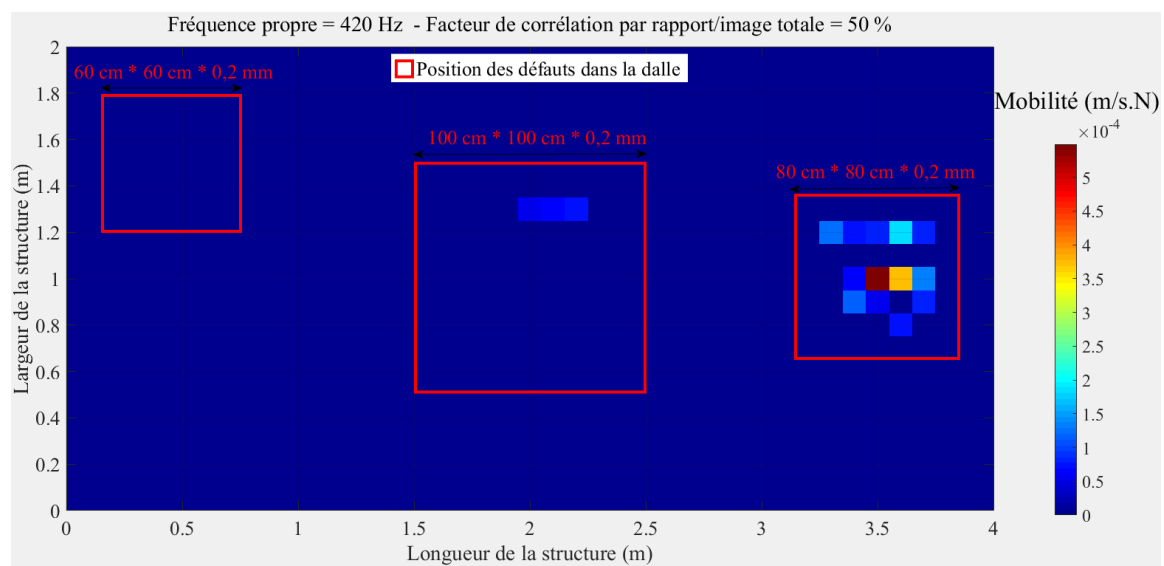


Figure A. 21 : Cartographie des mobilités – Détection et estimation du diamètre à partir de la cartographie issue de la fréquence propre de vibration de 420 Hz.

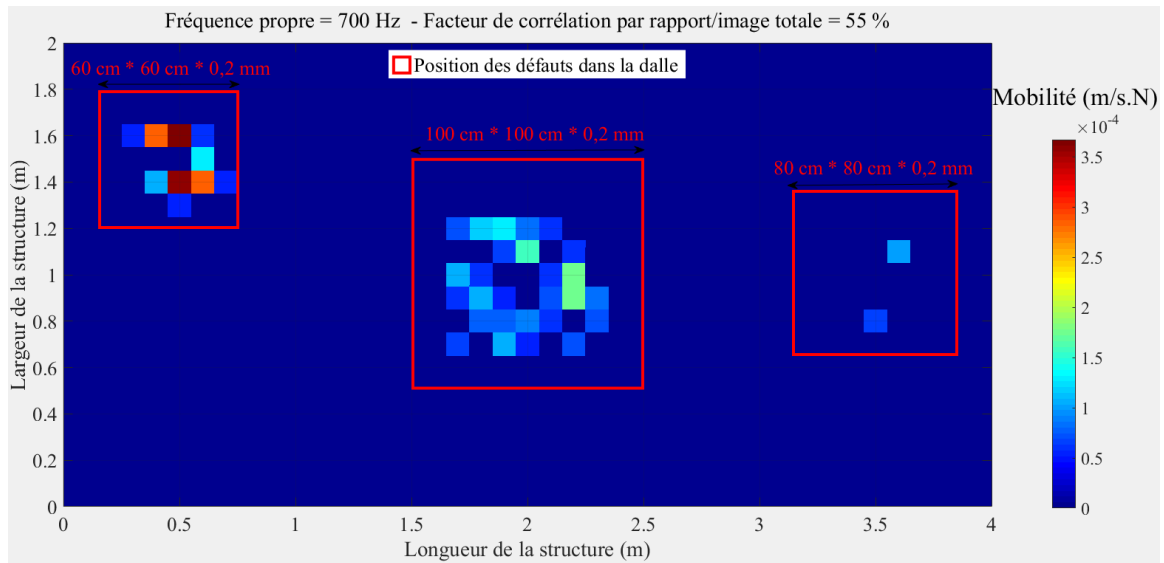


Figure A. 22 : Cartographie des mobilités – Cartographie pour la détection - Fréquence propre de vibration de 210 Hz.

### ➤ Résultats : Approche conventionnelle

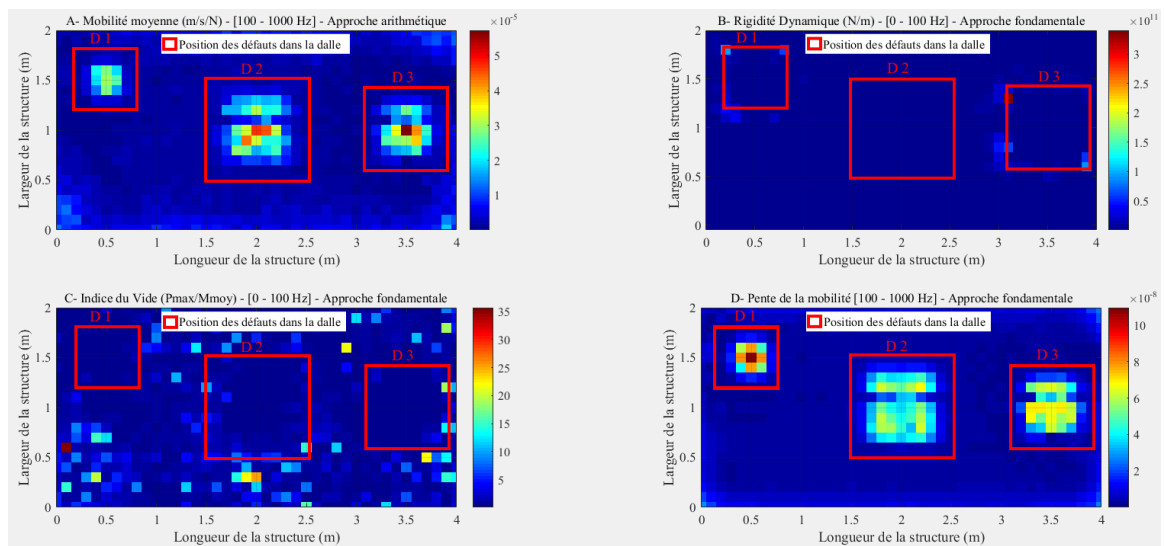


Figure A. 23 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes – B : Rigidité dynamique – C : Indice du vide – D : Pente de la mobilité.

➤ **Résultats : Approche « arithmétique » – Mobilité moyenne**

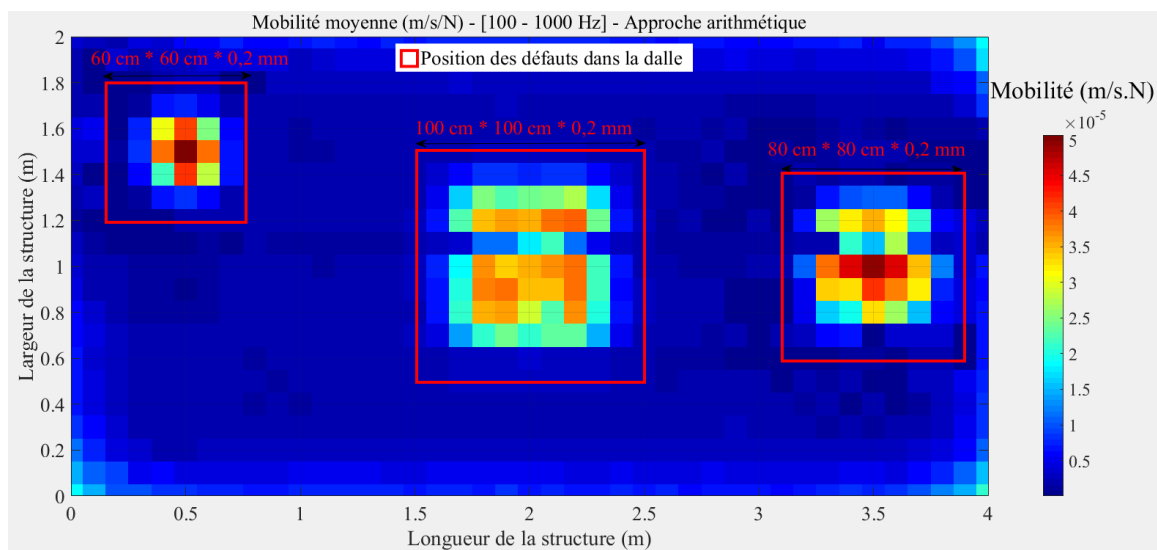


Figure A. 24 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes.



## ANNEXE B

### VALIDATION EXPÉRIMENTALE DE L'APPROCHE DEVÉLOPPÉE

#### B.1. Dalle expérimentale n° 1

➤ Courbes de mobilité spectrale expérimentales - RI

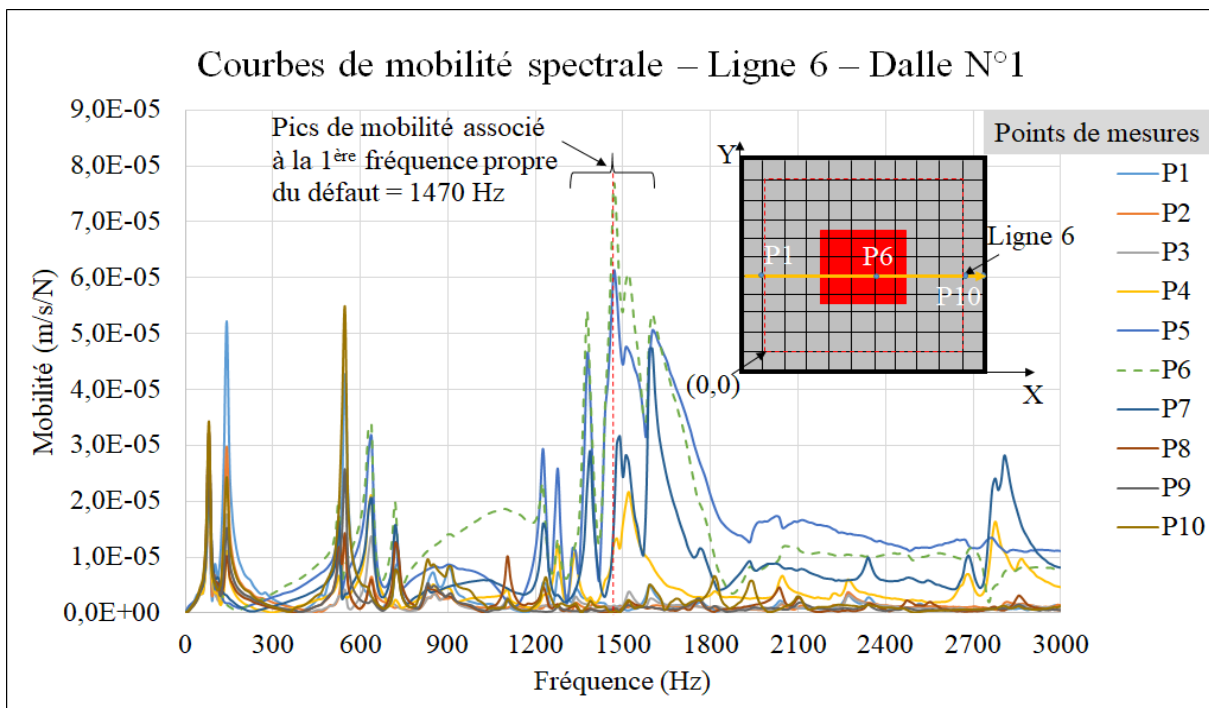


Figure B. 1 : Résultats expérimentaux – Courbes de mobilité spectrale  
Dalle expérimentale N°1

## ➤ Résultats cartographiques - Approche conventionnelle de la RI

### • Résultats numériques

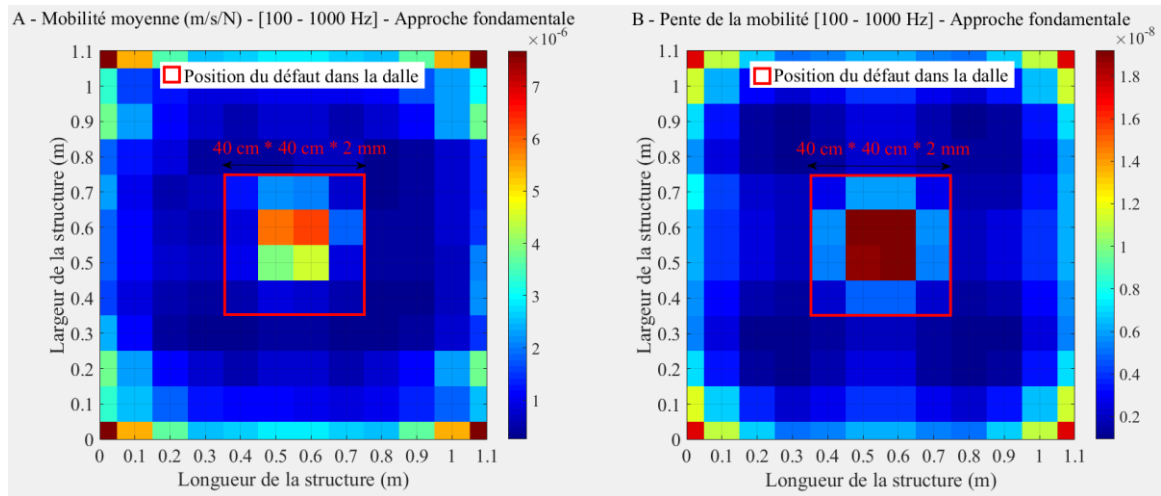


Figure B. 2 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilité moyenne – B : Pente de la mobilité.

### • Résultats expérimentaux

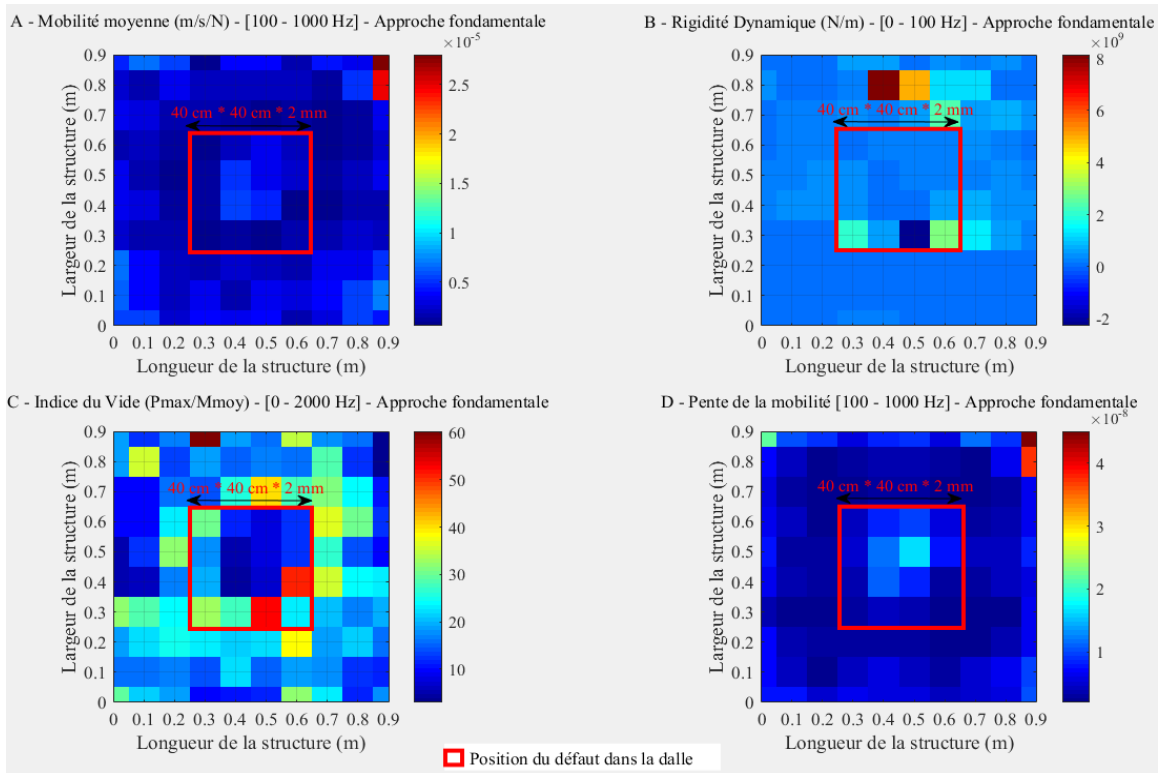


Figure B. 3 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilité moyenne – B : Rigidité dynamique – C : Indice du vide – D : Pente de la mobilité.

➤ **Résultats cartographiques - « Approche arithmétique » de la RI**

• **Résultats numériques**

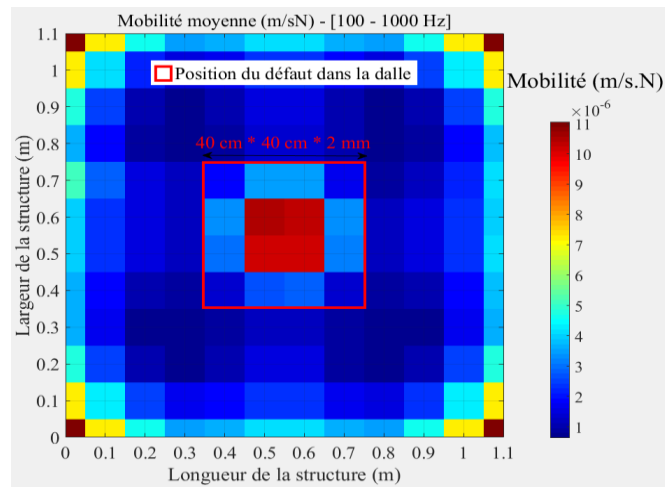


Figure B. 4 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes.

• **Résultats expérimentaux**

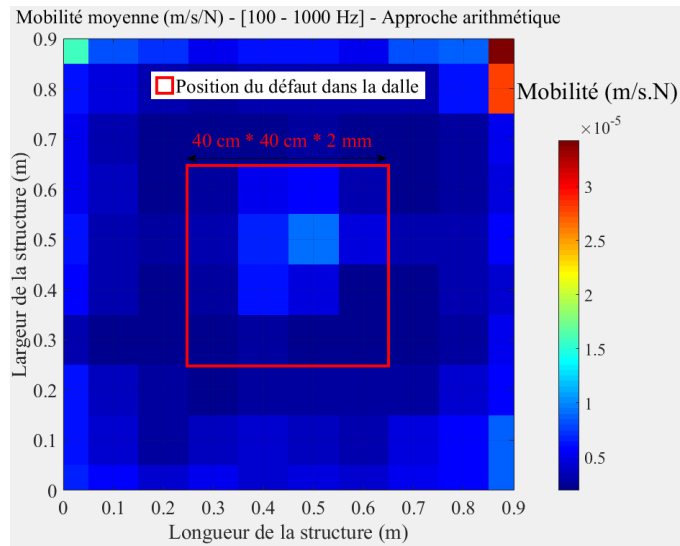


Figure B. 5 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes.

### ➤ Résultats de la Thermographie infrarouge

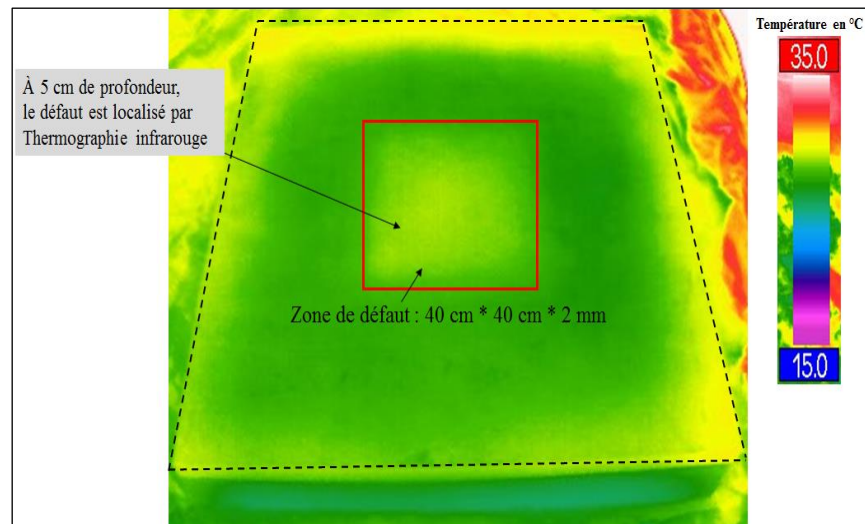


Figure B. 6 : Détection de la qualité de l'adhérence par Thermographie infrarouge Défaut placé à 5 cm de profondeur de la dalle – Dalle N° 1.

### ➤ Résultats de la méthode d'Essai sonique

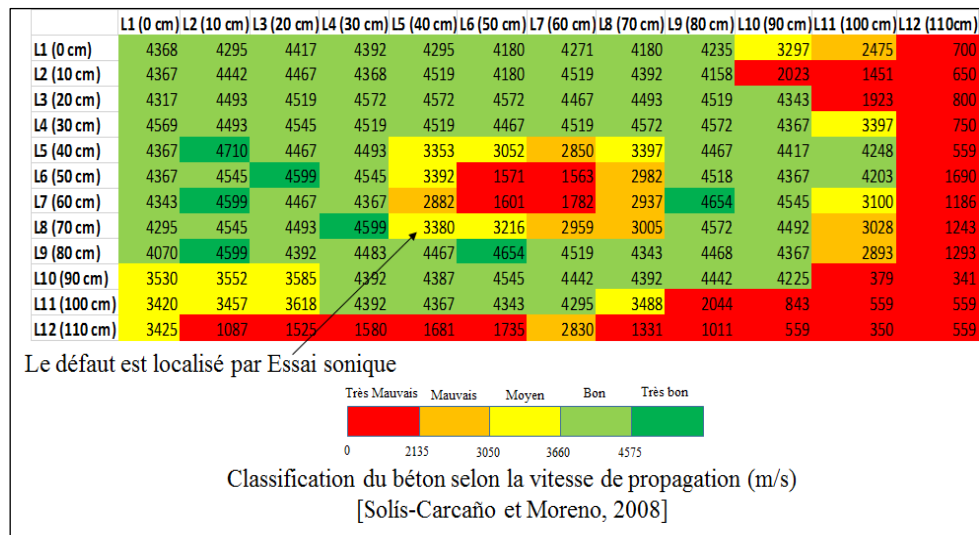


Figure B. 7 : Détection de la qualité de l'adhérence par Essai sonique – Mesure des vitesses des ondes de compression - Dalle n° 1.

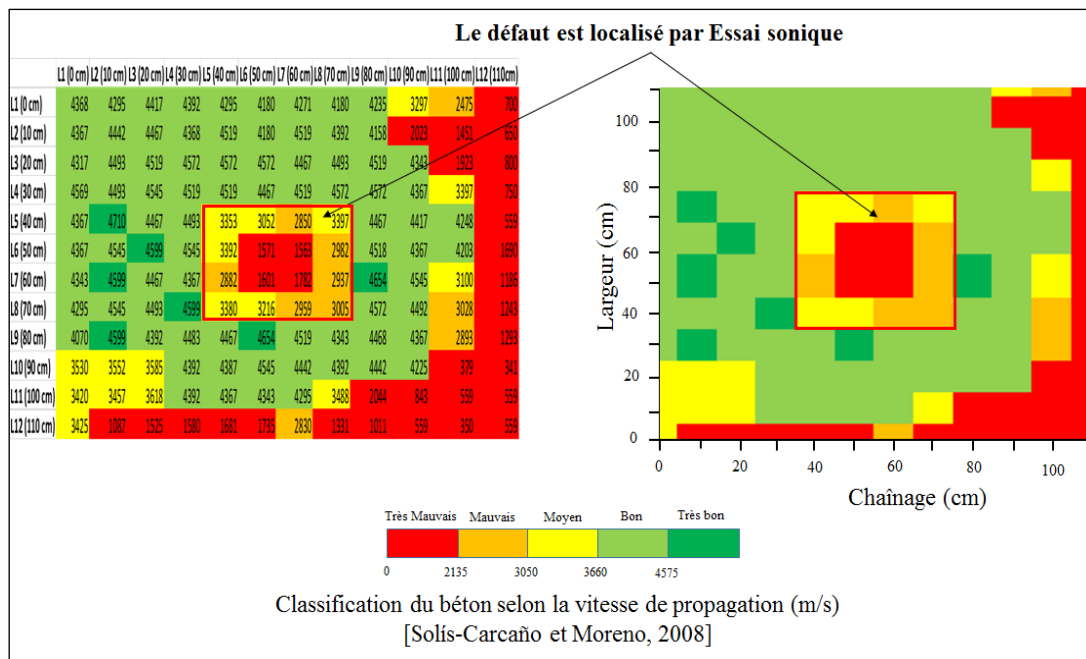


Figure B. 8 : Détection de la qualité de l'adhérence par Essai sonique – Mesure des vitesses des ondes de compression – Dalle N° 1.

### ➤ Résultats et analyse à partir de la méthode Radar (GPR)

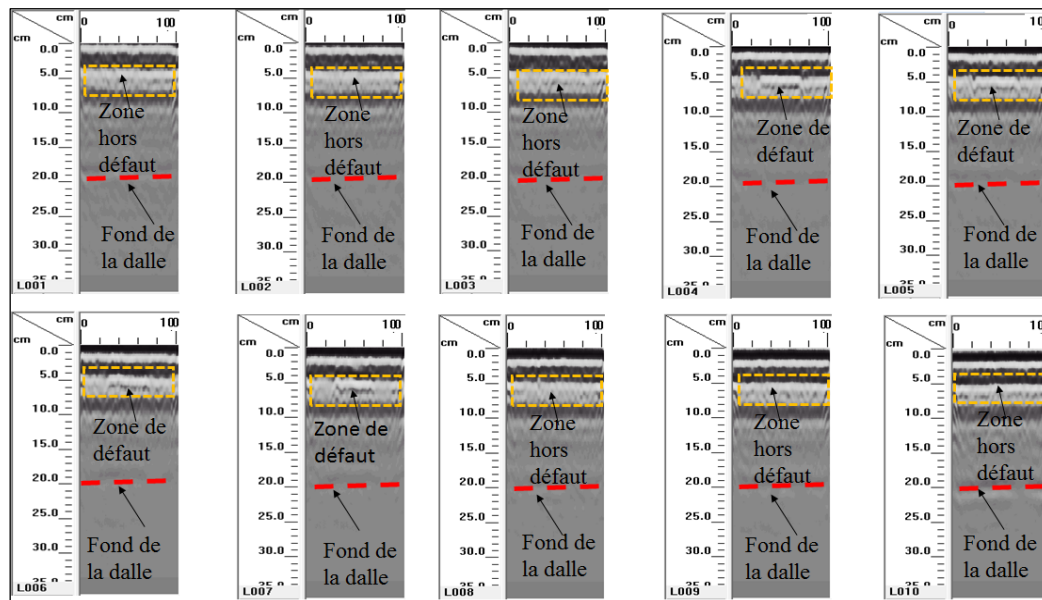


Figure B. 9 : Détection de la qualité de l'adhérence par géoradar (Imagerie 2D) – Défaut placé à 5 cm de profondeur de la dalle – Dalle N° 1.

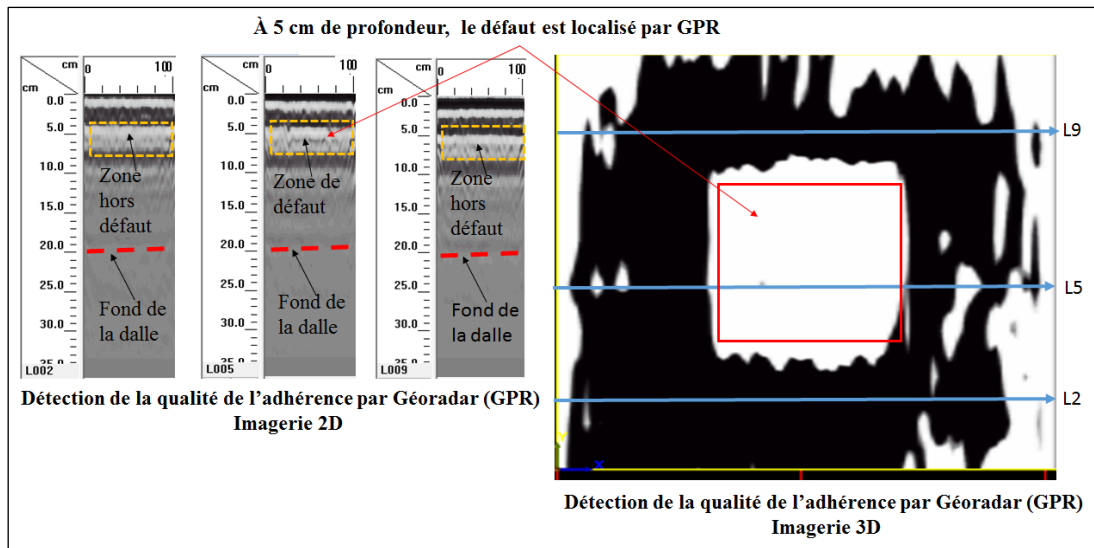


Figure B. 10 : Détection de la qualité de l'adhérence par géoradar – Défaut placé à 5 cm de profondeur de la dalle - Dalle N° 1.

## B.2. Dalle expérimentale n° 2

### ➤ Protocole de fabrication : Dalle expérimentale N° 2

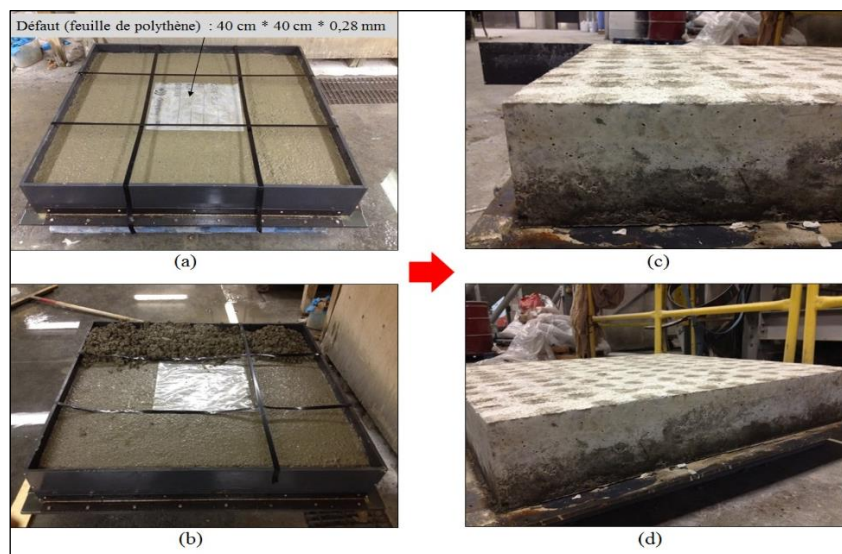


Figure B. 11 : Dalle N° 2, (a) Mise en place du défaut, (b) remplissage du béton, (c) et (d) dalle monolithique.

➤ Résultats expérimentaux - Courbes de mobilité spectrale - RI

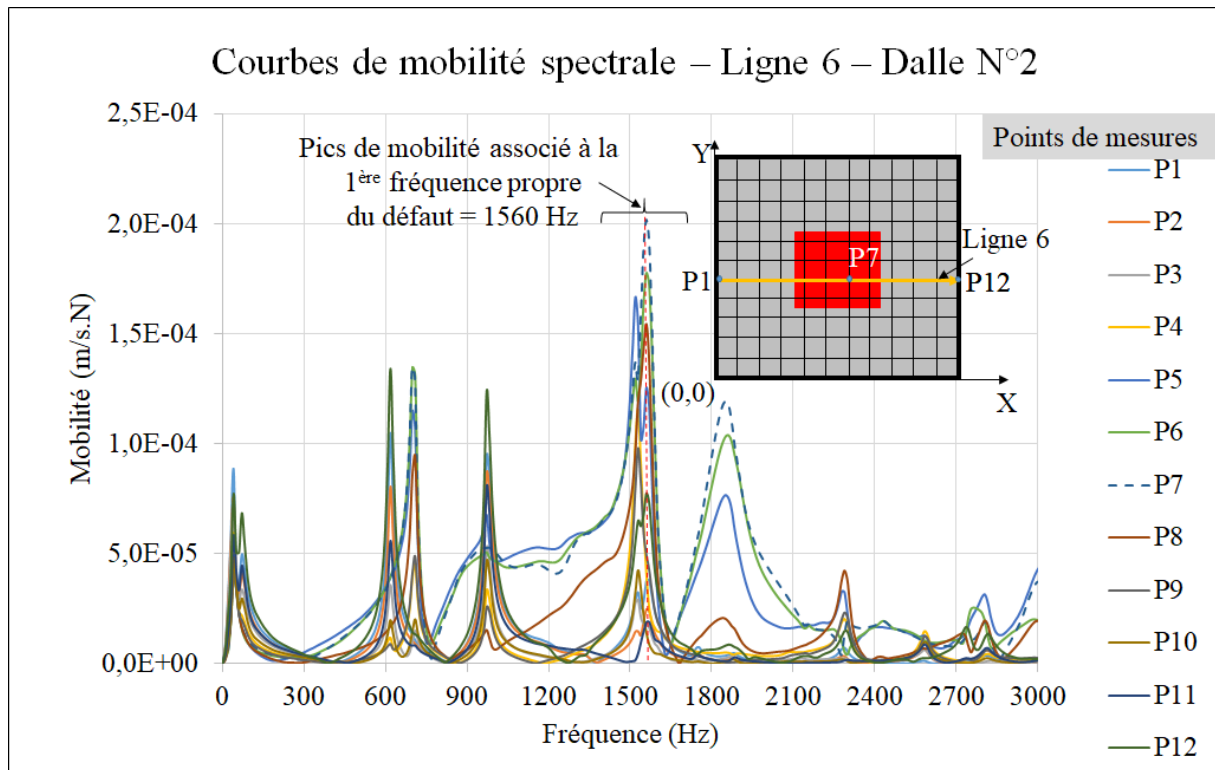


Figure B. 12 : Résultats expérimentaux – Courbes de mobilité spectrale  
Dalle expérimentale N°2



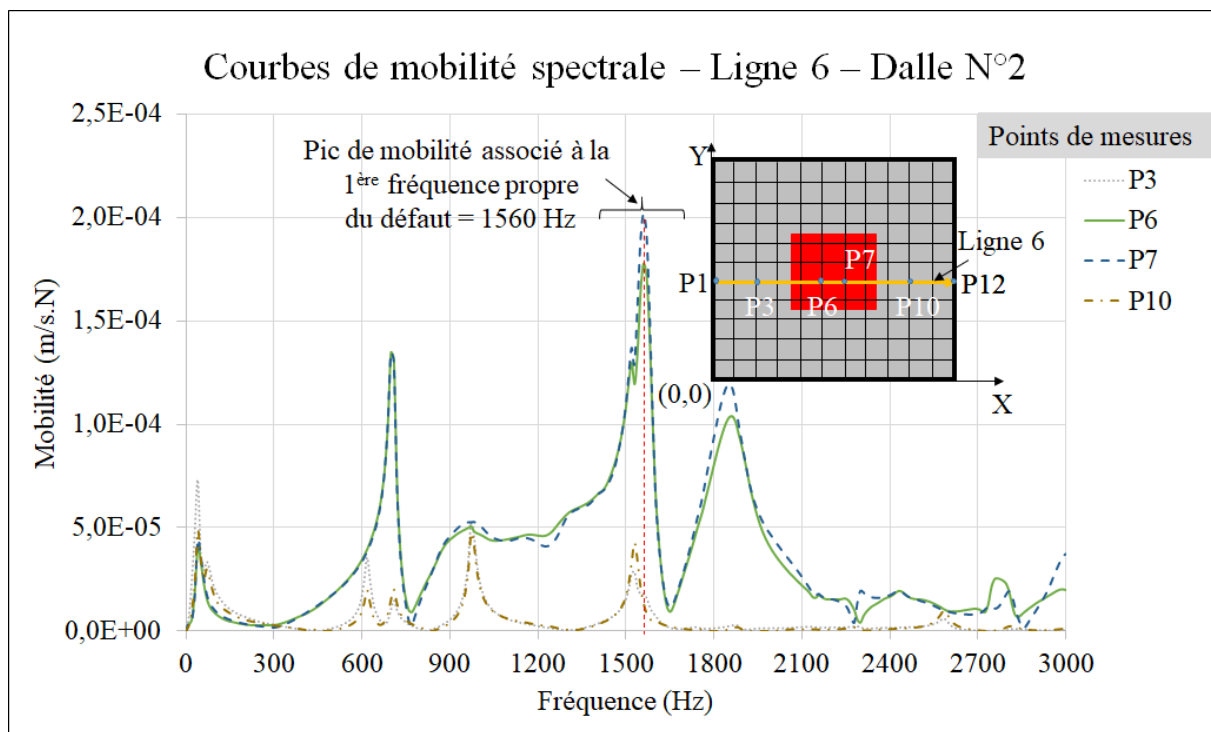


Figure B. 13 : Résultats expérimentaux – Courbes de mobilité spectrale  
Dalle expérimentale N°2

### B.3. Dalle expérimentale n° 3

#### ➤ Protocole de fabrication : Dalle expérimentale N° 3

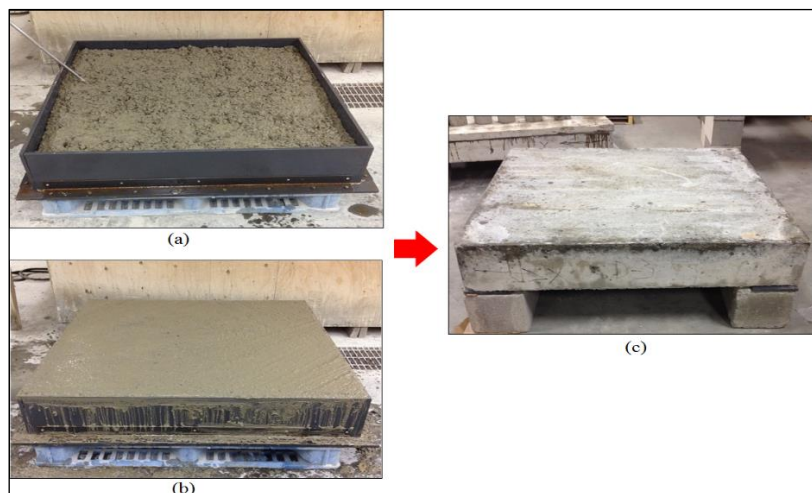


Figure B. 14 : Dalle N° 3, (a) Mise en place du béton, (b) Remplissage du moule, (c) Dalle monolithique finale.



➤ **Résultats expérimentaux - Courbes de mobilité spectrale**

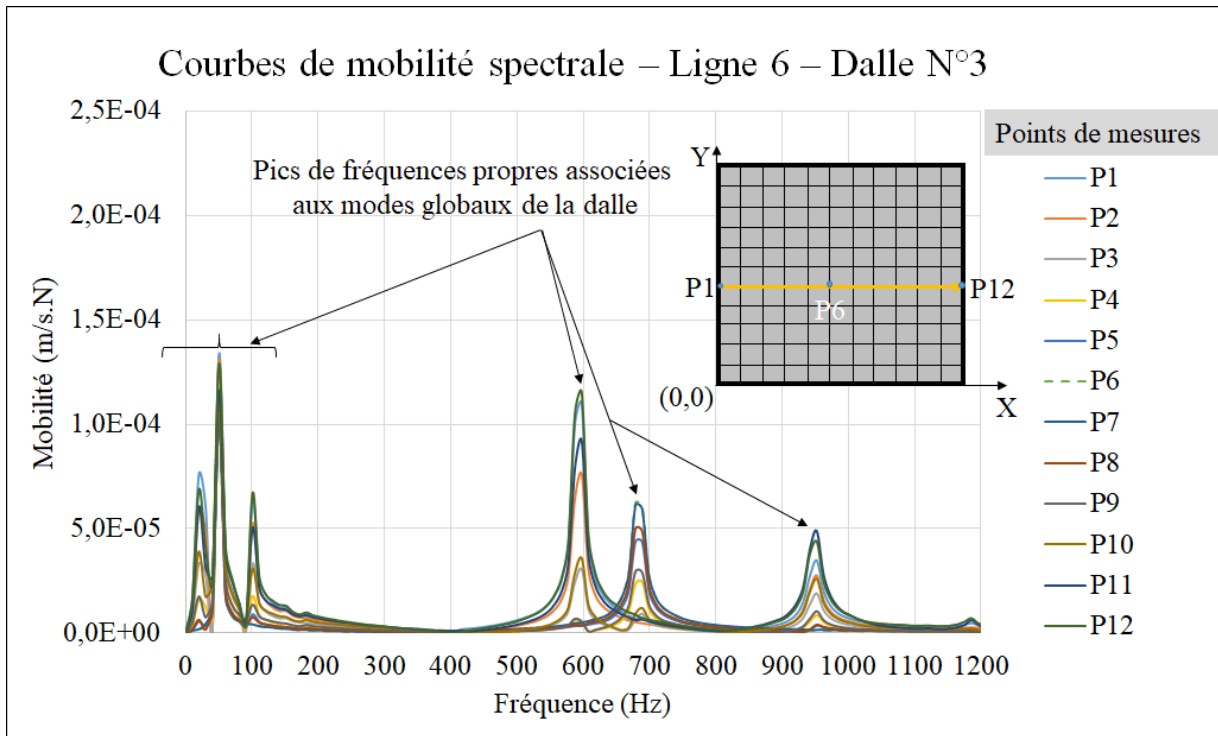


Figure B. 15 : Résultats expérimentaux – Courbes de mobilité spectrale  
Dalle expérimentale N°3

➤ **Résultats cartographiques - Approche conventionnelle de la RI**

• **Résultats numériques**

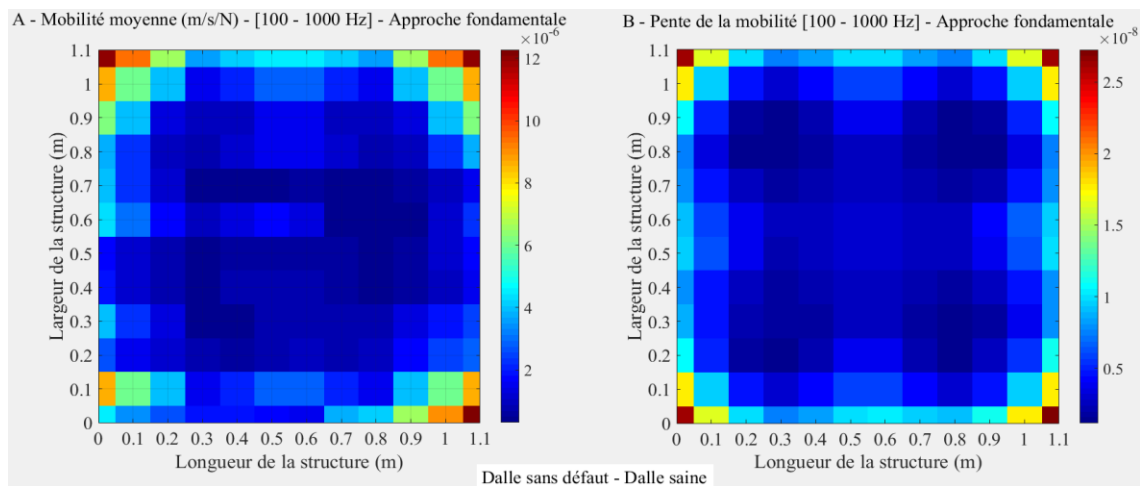


Figure B. 16 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes – B :  
Pente de la mobilité.

- **Résultats expérimentaux**

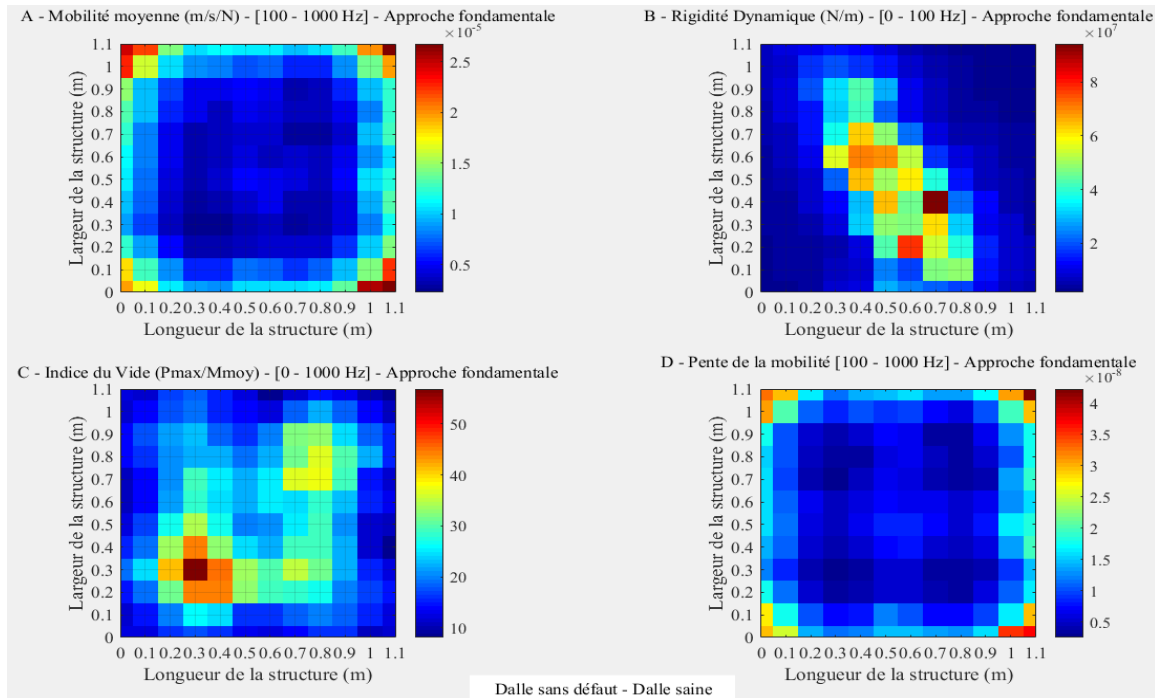


Figure B. 17 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes – B : Rigidité dynamique – C : Indice du vide – D : Pente de la mobilité.

➤ **Résultats cartographiques - « Approche arithmétique » de la RI**

- **Résultats numériques**

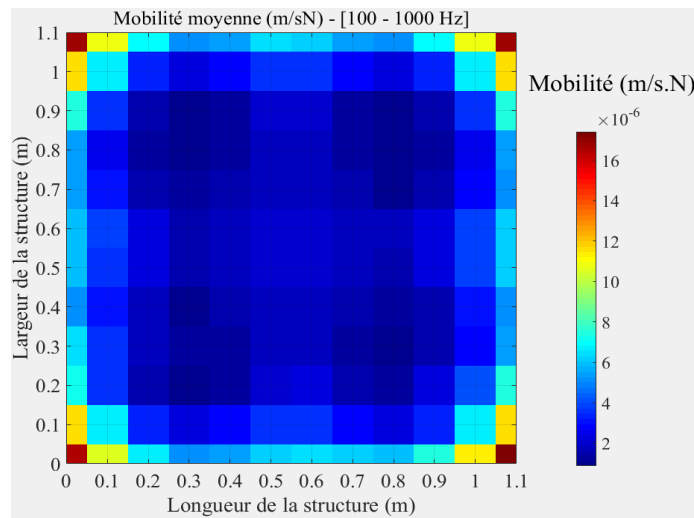


Figure B. 18 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes.

- **Résultats expérimentaux**

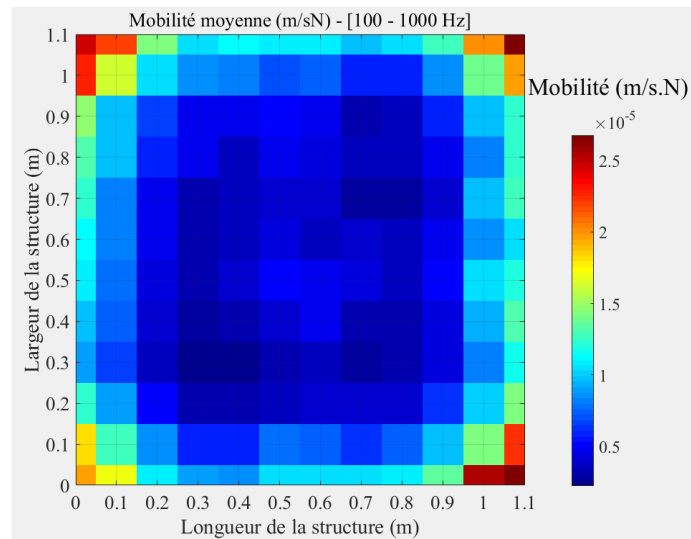


Figure B. 19 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes.

- **Résultats de la Thermographie infrarouge**

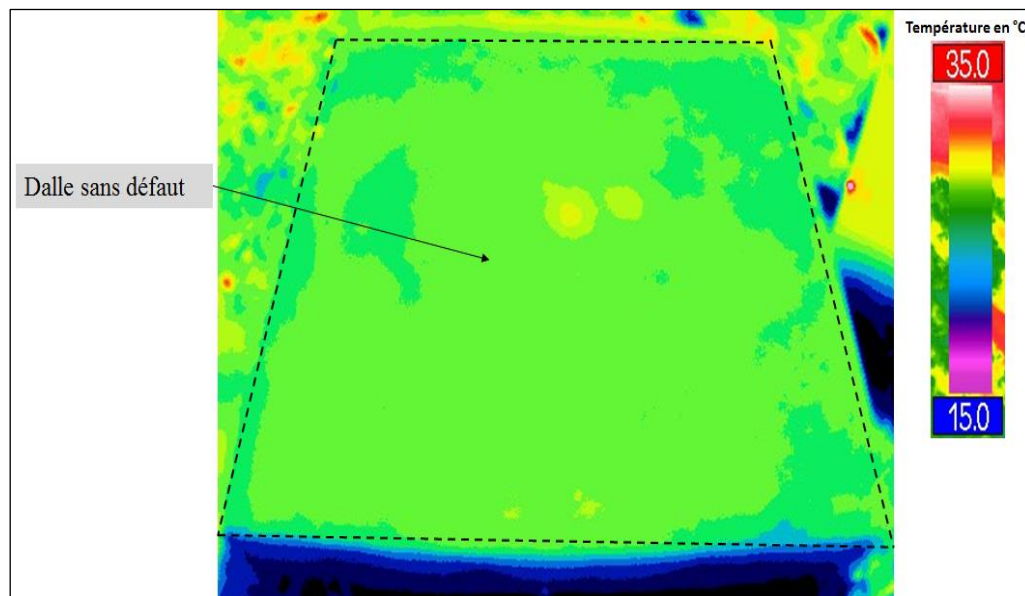


Figure B. 20 : Détection de la qualité de l'adhérence par Thermographie infrarouge Dalle saine sans défaut (Dalle de référence) – Dalle N° 3.

➤ Résultats de la méthode GPR

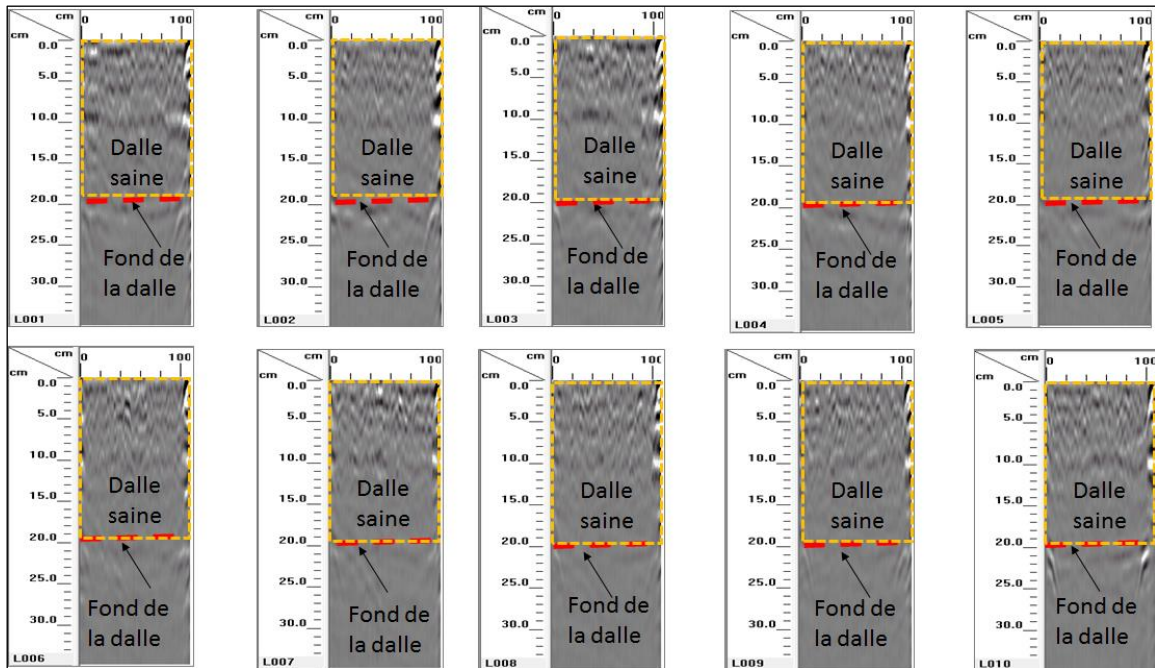


Figure B. 21 : Détection de la qualité de l'adhérence par géoradar (Imagerie 2D) – Imagerie 2D Dalle saine sans défaut (Dalle de référence) – Dalle N° 3.

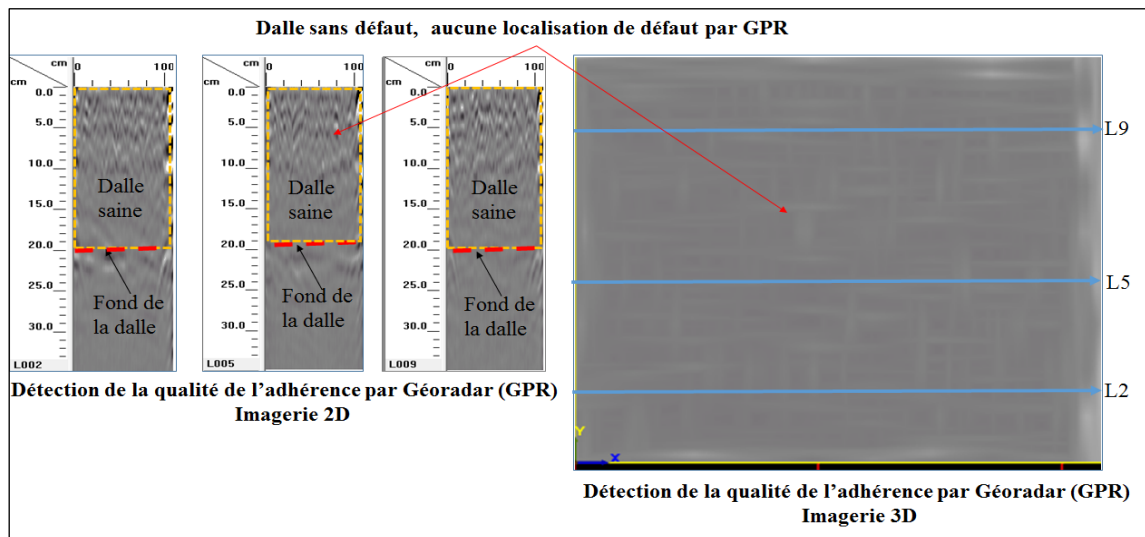


Figure B. 22 : Détection de la qualité de l'adhérence par géoradar (Imagerie 2D) – Dalle saine sans défaut (Dalle de référence) – Dalle N° 3.

## B.4. Dalle expérimentale n° 4

### ➤ Résultats expérimentaux - Courbes de mobilité spectrale - RI

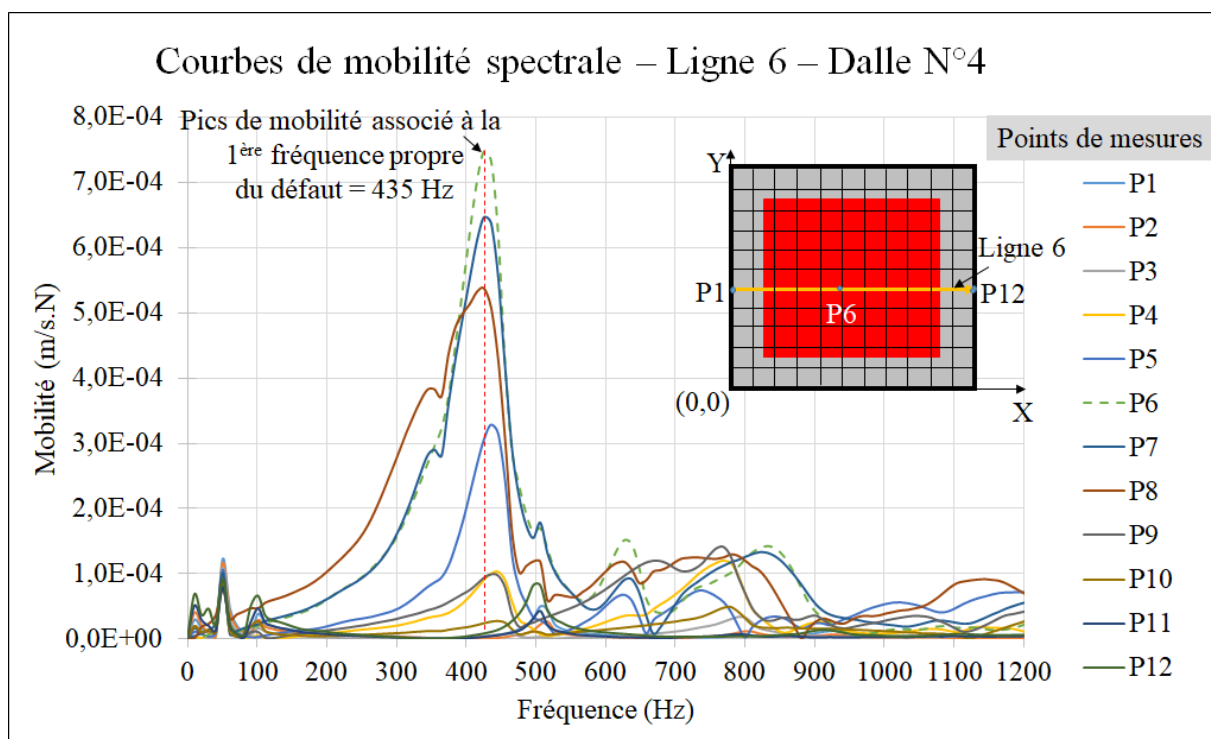


Figure B. 23 : Résultats expérimentaux – Courbes de mobilité spectrale  
Dalle expérimentale N°4

## ➤ Résultats cartographiques - Approche conventionnelle de la RI

### • Résultats numériques

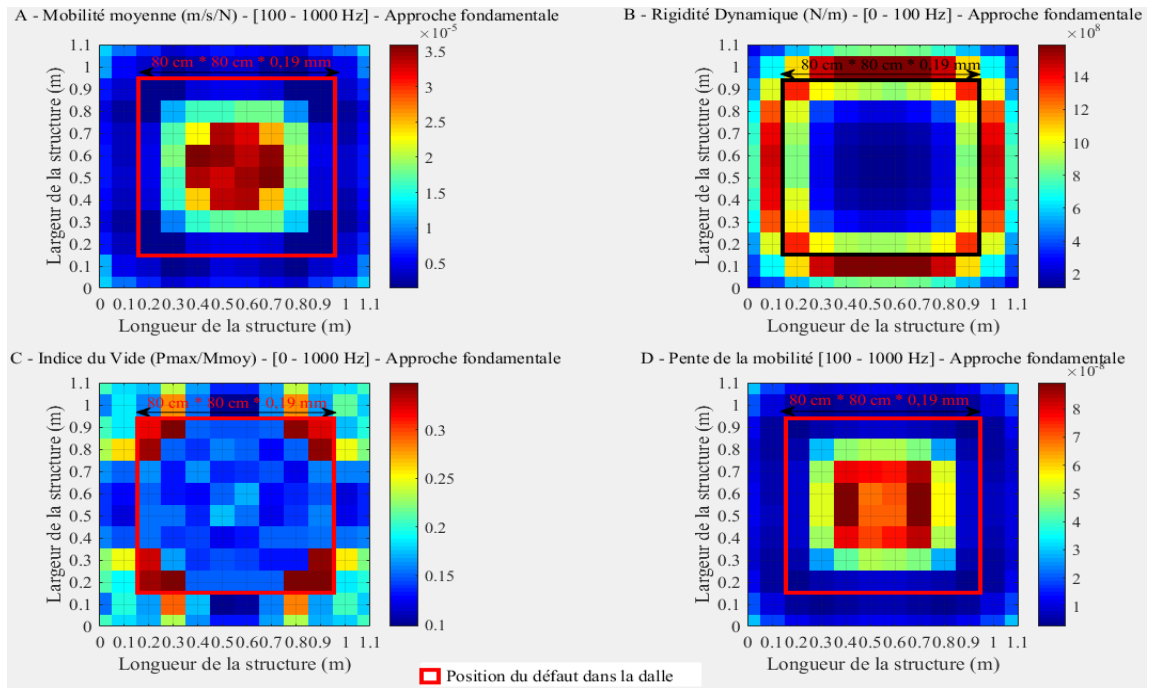


Figure B. 24 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilités moyennes – B : Rigidité dynamique – C : Indice du vide – D : Pente de la mobilité.

### • Résultats expérimentaux

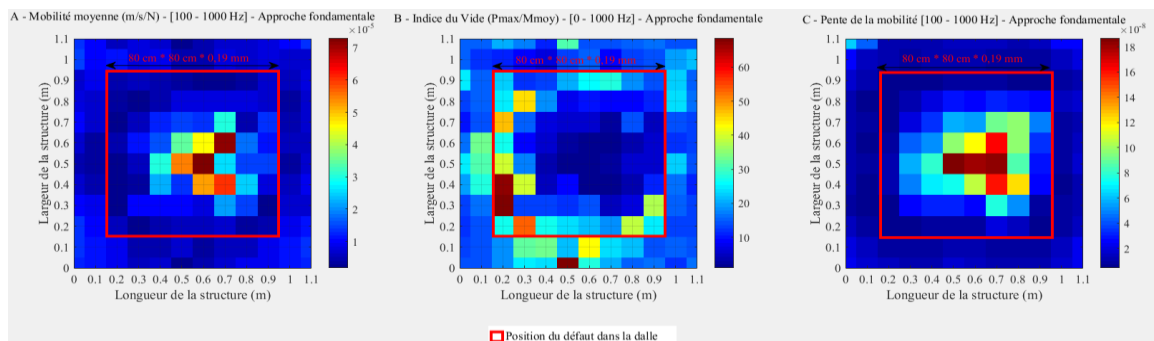


Figure B. 25 : Approche conventionnelle : Cartographies – A : Mobilité moyenne – B : Indice du vide – C : Pente de la mobilité.

➤ **Résultats cartographiques - Approche « arithmétique » de la RI**

• **Résultats numériques**

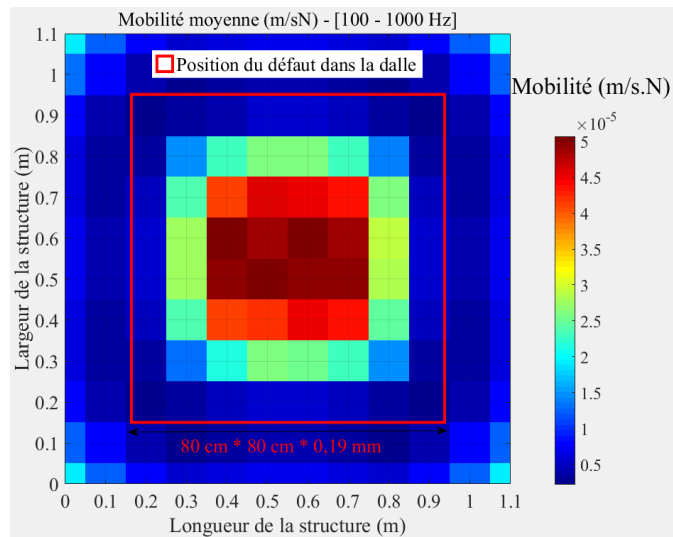


Figure B. 26 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes.

• **Résultats expérimentaux**

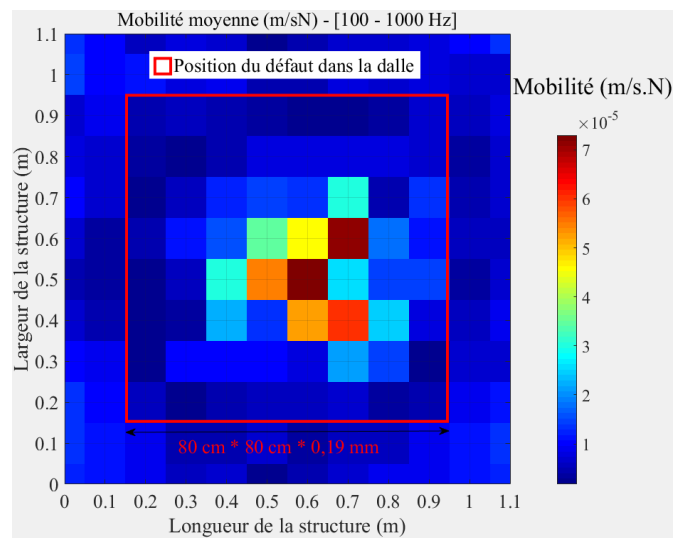


Figure B. 27 : Approche « arithmétique » – Cartographie des mobilités moyennes.



➤ Résultats et analyse à partir de la Thermographie infrarouge

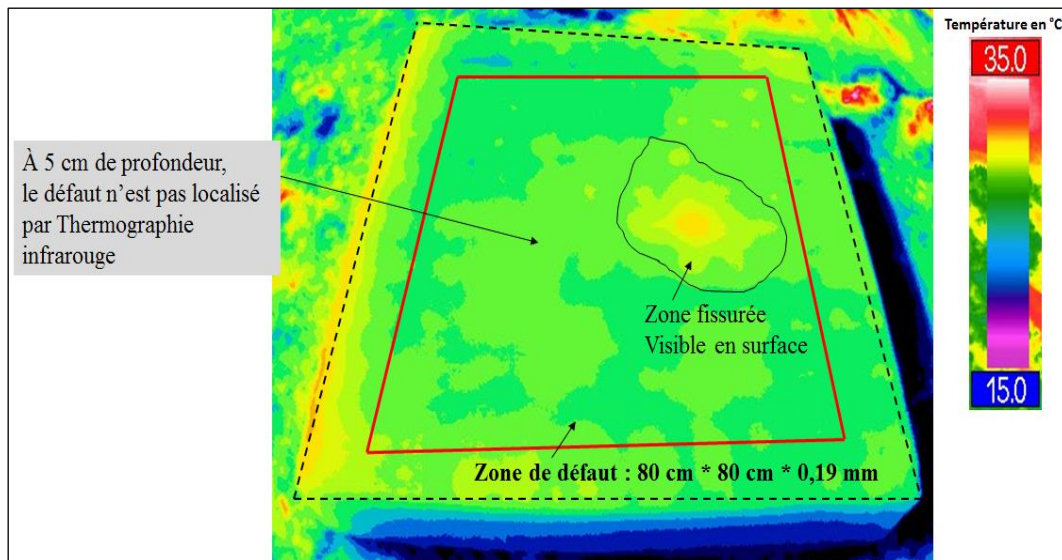


Figure B. 28 : Détection de la qualité de l'adhérence par Thermographie infrarouge - Défaut placé à 5 cm de profondeur de la dalle – Dalle N°4.

➤ Résultats et analyse à partir de la méthode d'Essai sonique

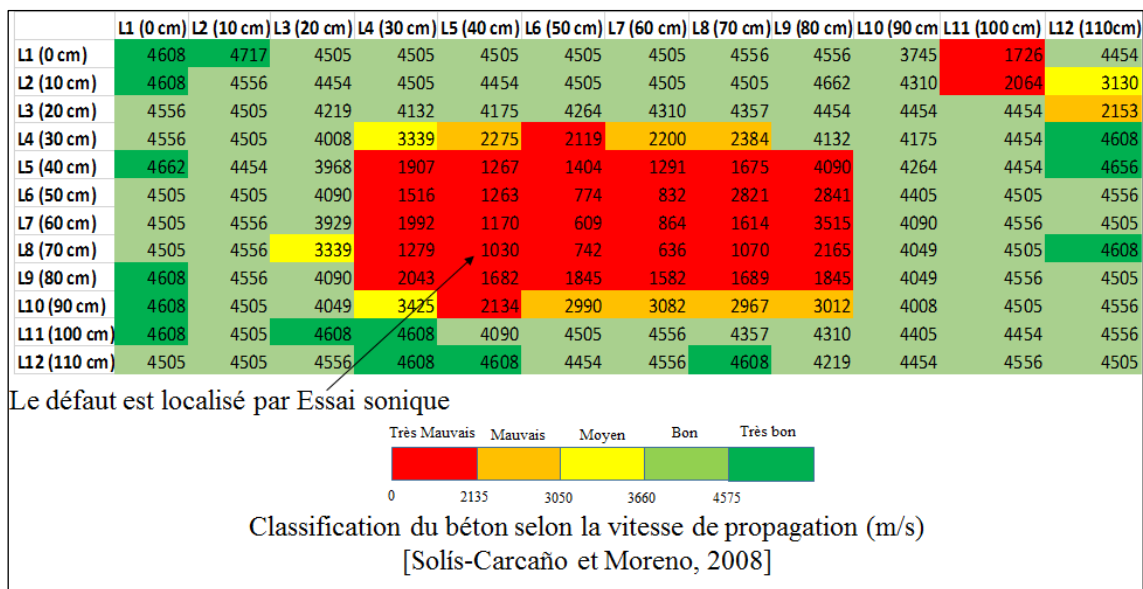


Figure B. 29 : Détection de la qualité de l'adhérence par Essai sonique – Mesure des vitesses des ondes de compression - Dalle expérimentale N° 4.



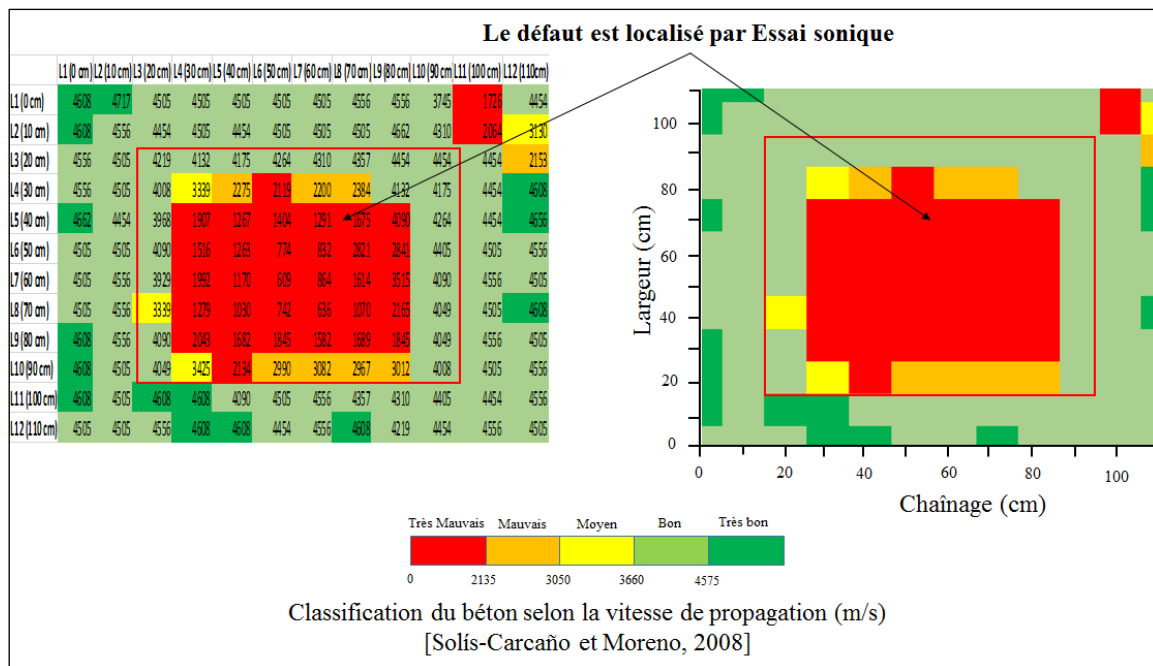


Figure B. 30 : Détection de la qualité de l'adhérence par Essai sonique – Mesure des vitesses des ondes de compression – Dalle expérimentale N° 4.

### ➤ Résultats et analyse à partir de la méthode GPR

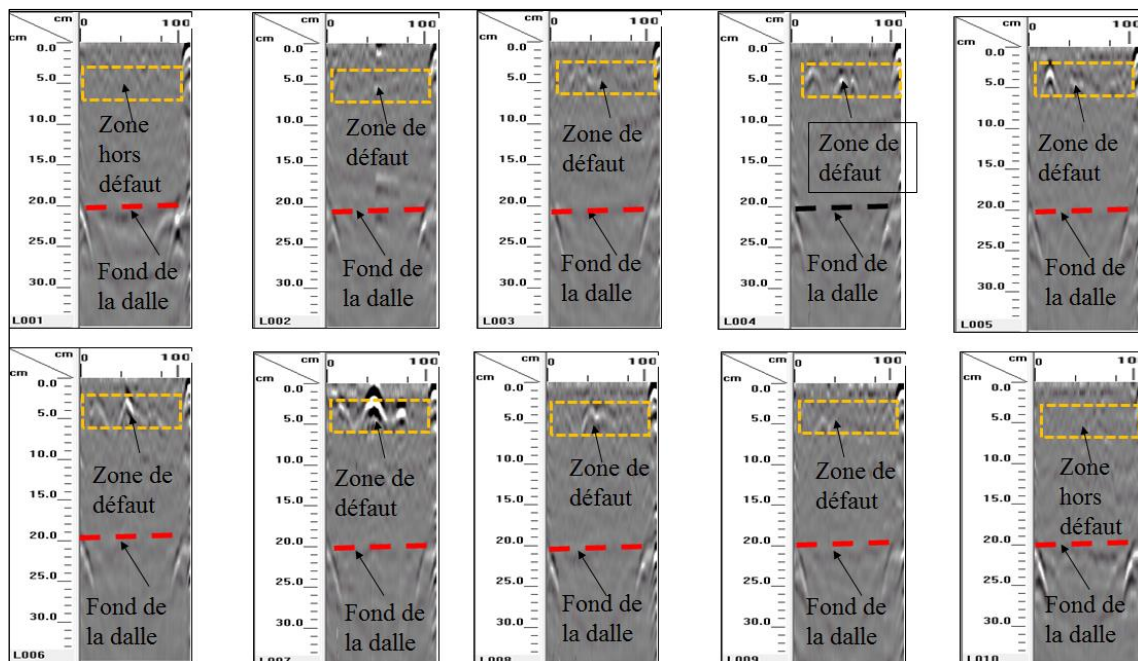


Figure B. 31 : Détection de la qualité de l'adhérence par géoradar (Imagerie 2D) – Défaut placé à 5 cm de profondeur de la dalle – Dalle N° 4.

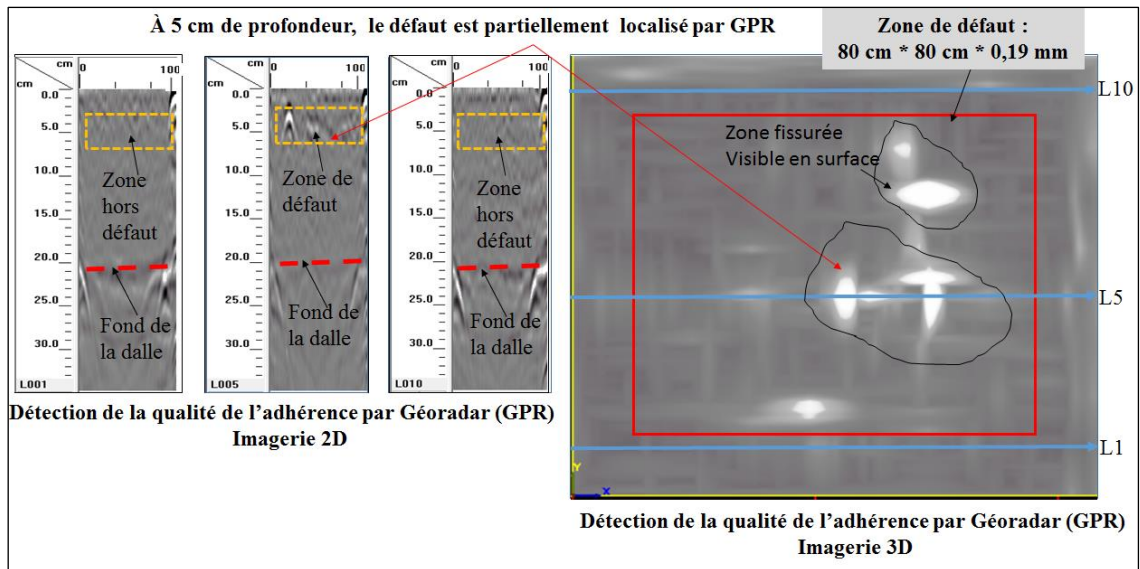


Figure B. 32 : Détection de la qualité de l'adhérence par géoradar – Défaut placé à 5 cm de profondeur de la dalle - Dalle expérimentale N° 4.

## B.5. Dalle expérimentale n° 5

### ➤ Protocole de fabrication : Dalle expérimentale N° 5

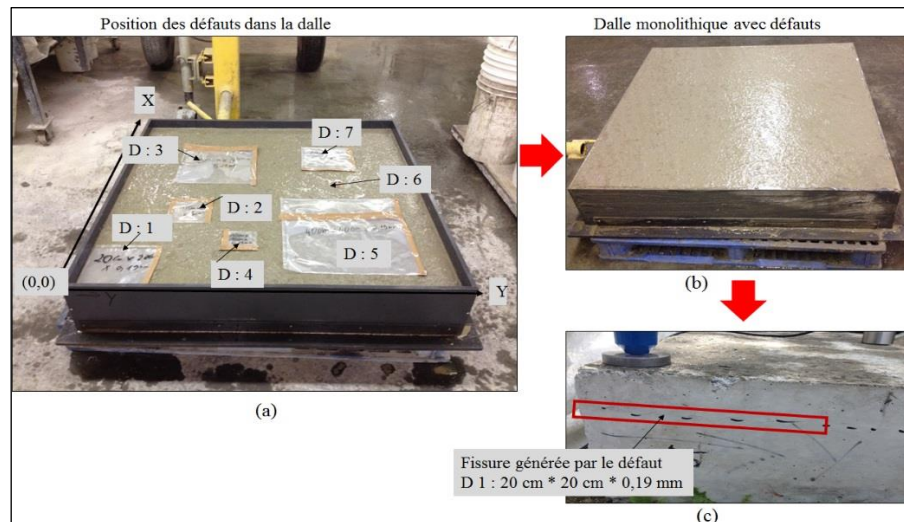


Figure B. 33 : Dalle N° 5, (a) Mise en place des défauts (**Tableau 9.1**), (b) Remplissage du béton, (c) Dalle monolithique finale avec défauts.

➤ Résultats expérimentaux - Courbes de mobilité spectrale - RI

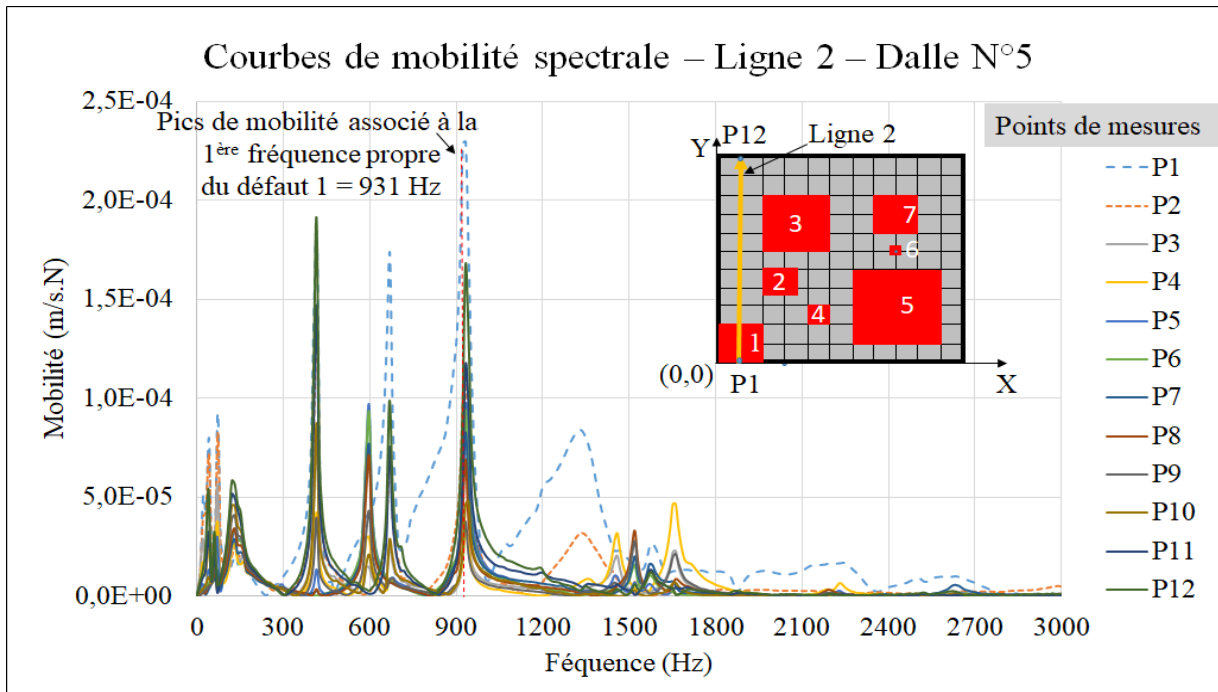


Figure B. 34 : Résultats expérimentaux – Courbes de mobilité spectrale  
Dalle expérimentale N°5

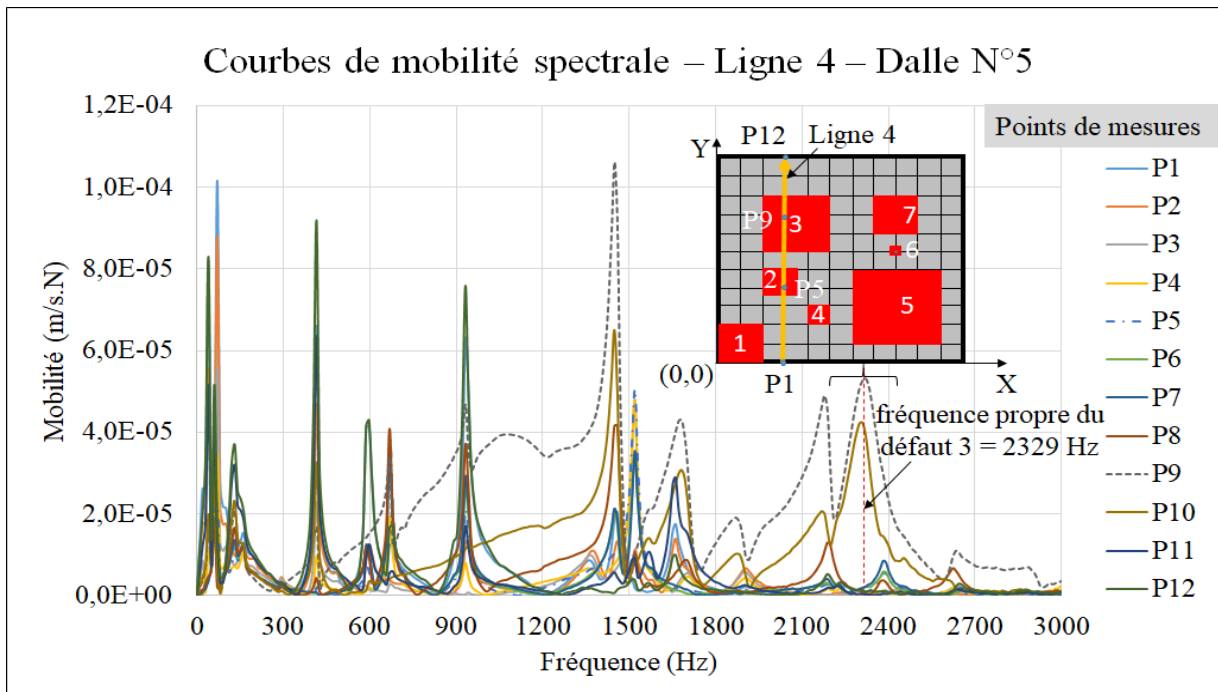


Figure B. 35 : Résultats expérimentaux – Courbes de mobilité spectrale  
Dalle expérimentale N°5

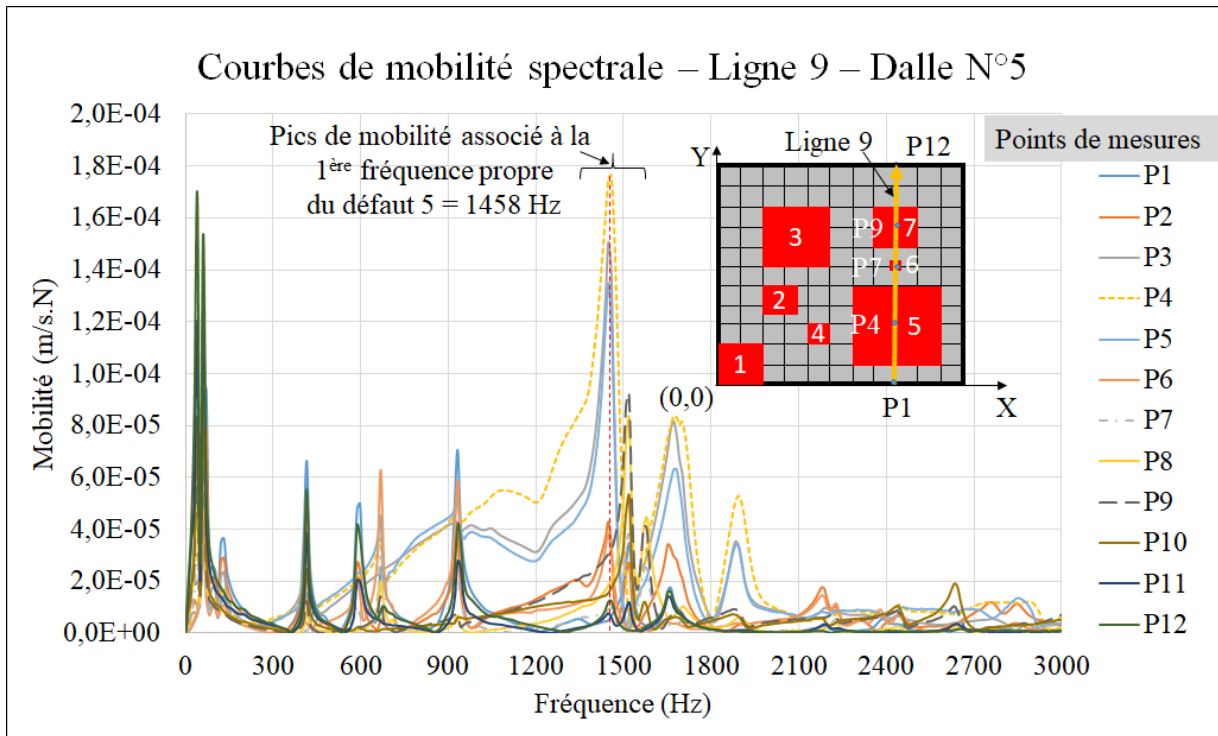


Figure B. 36 : Résultats expérimentaux – Courbes de mobilité spectrale  
Dalle expérimentale N°5

## B.6. Dalle expérimentale n° 6

### ➤ Protocole de fabrication : Dalle expérimentale N° 6

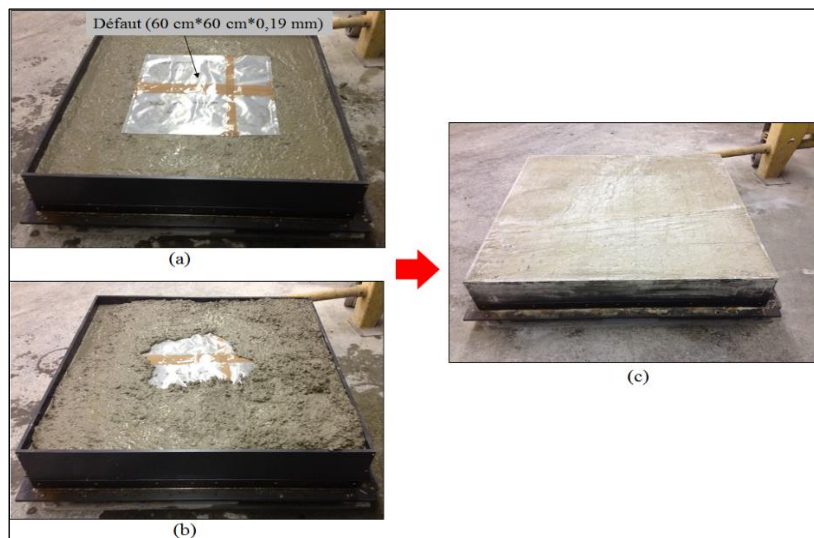


Figure B. 37 : Dalle N° 6, (a) Mise en place du défaut, (b) Remplissage du moule, (c) Dalle monolithique fabriquée.



## B.7. Dalle expérimentale n° 7

### ➤ Protocole de fabrication : Dalle expérimentale N° 7

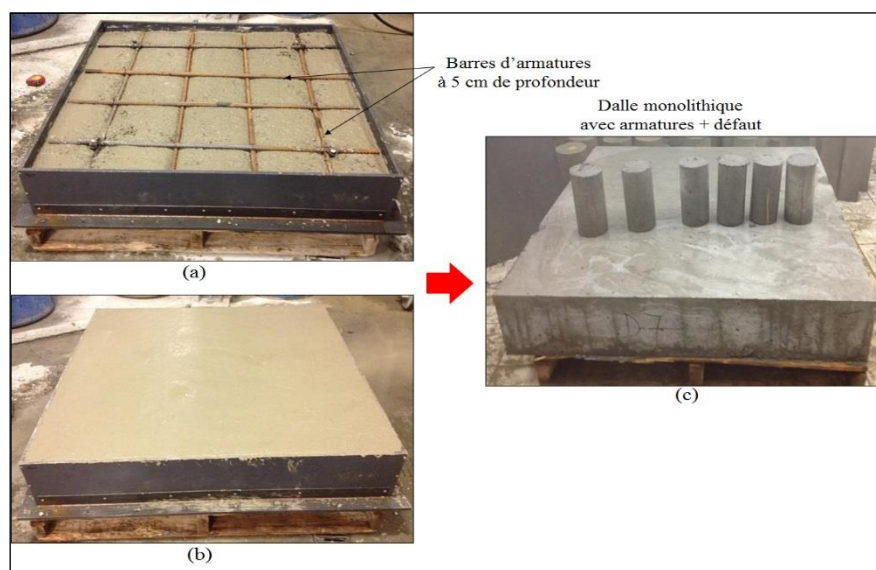


Figure B. 38 : Dalle N° 7, (a) Remplissage du béton et mise en place des barres d'armature, (b) Remplissage du moule, (c) Dalle monolithique finale.

## ANNEXE C

### VALIDATION DE L'APPROCHE DÉVELOPPÉE –

**Application : Détection des vides entre les blocs de granites et un mur de béton**

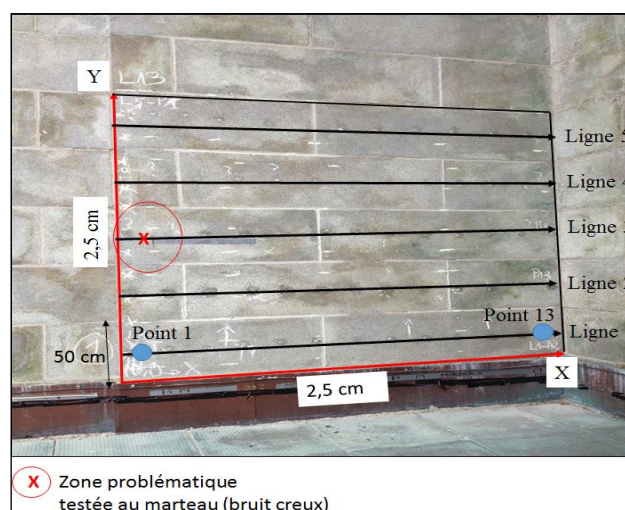


Figure C. 1 : Mur N°1 ausculté et configuration des mesures

### C.1. Résultats : Approche développée – Mur N° 1

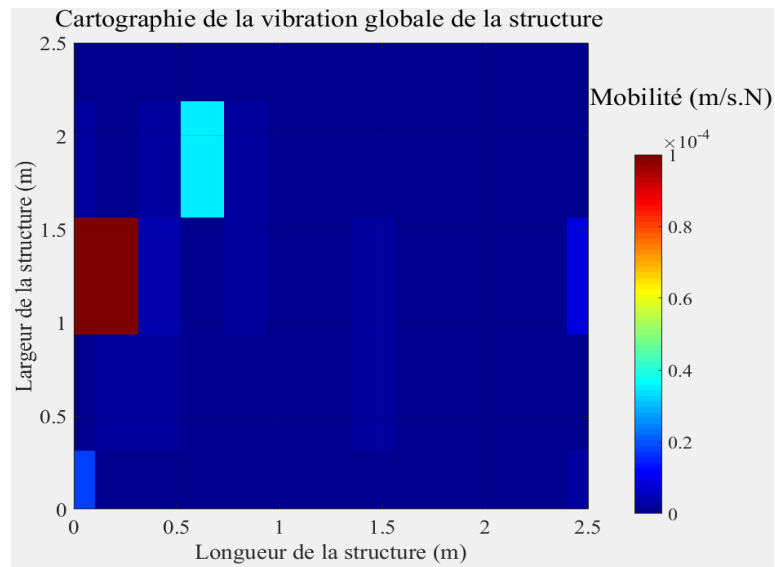


Figure C. 2 : Cartographies des mobilités : Détection des défauts – Mur N° 1

### C.2. Résultats : Approche développée - Mur N° 2

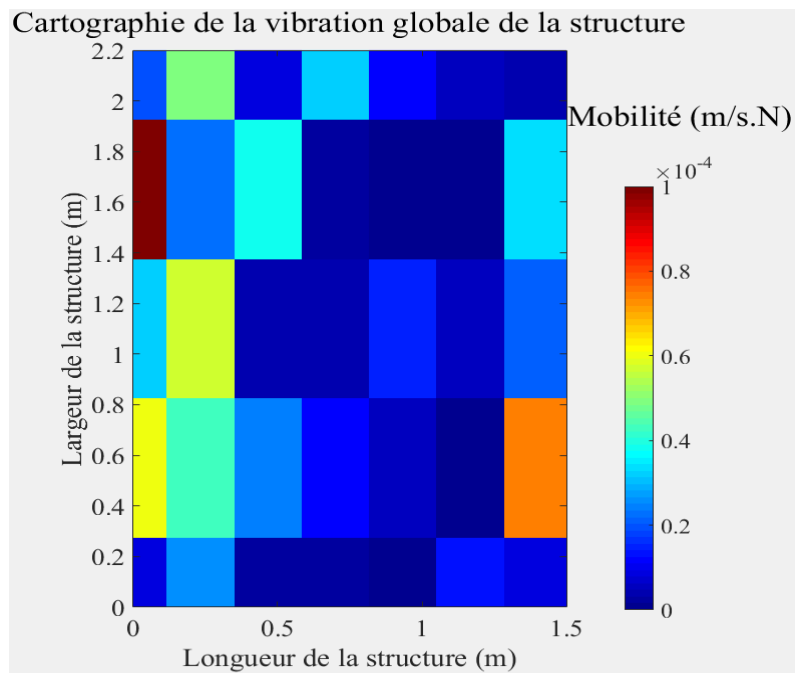


Figure C. 3 : Cartographies des mobilités : Détection des défauts – Mur N° 2

### C.3. Résultats : Approche développée - Mur N° 3

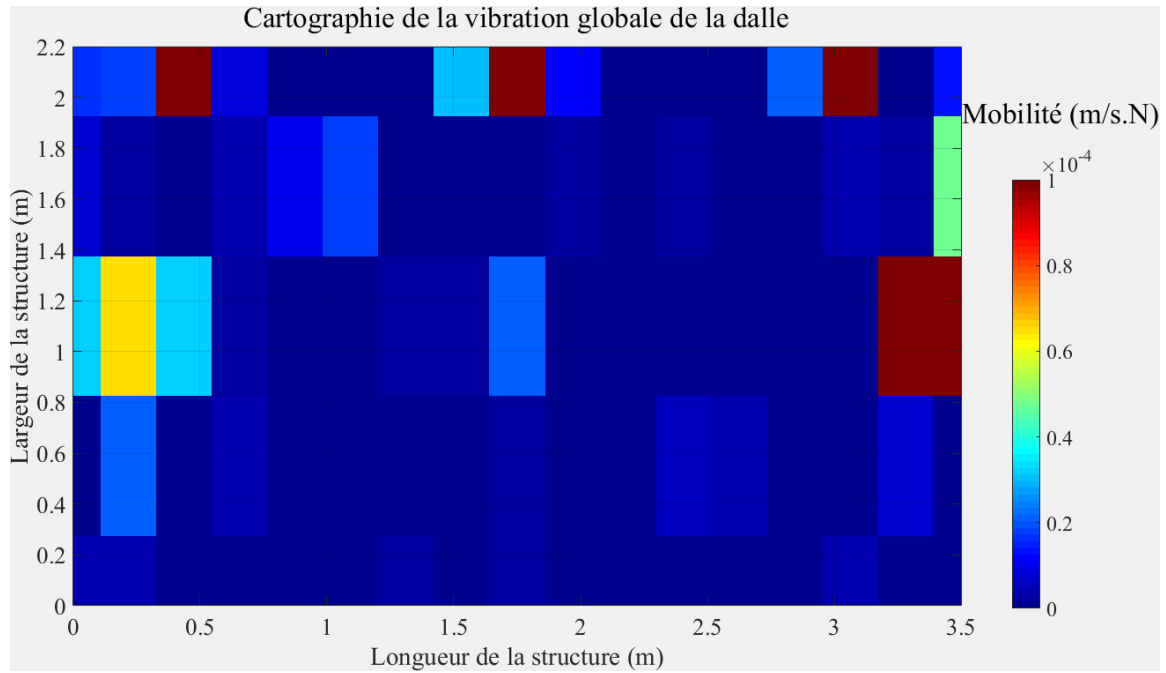


Figure C. 4 : Cartographies des mobilités : Détection des défauts – Mur N° 3

#### C.4. Résultats : Approche développée - Mur N° 4

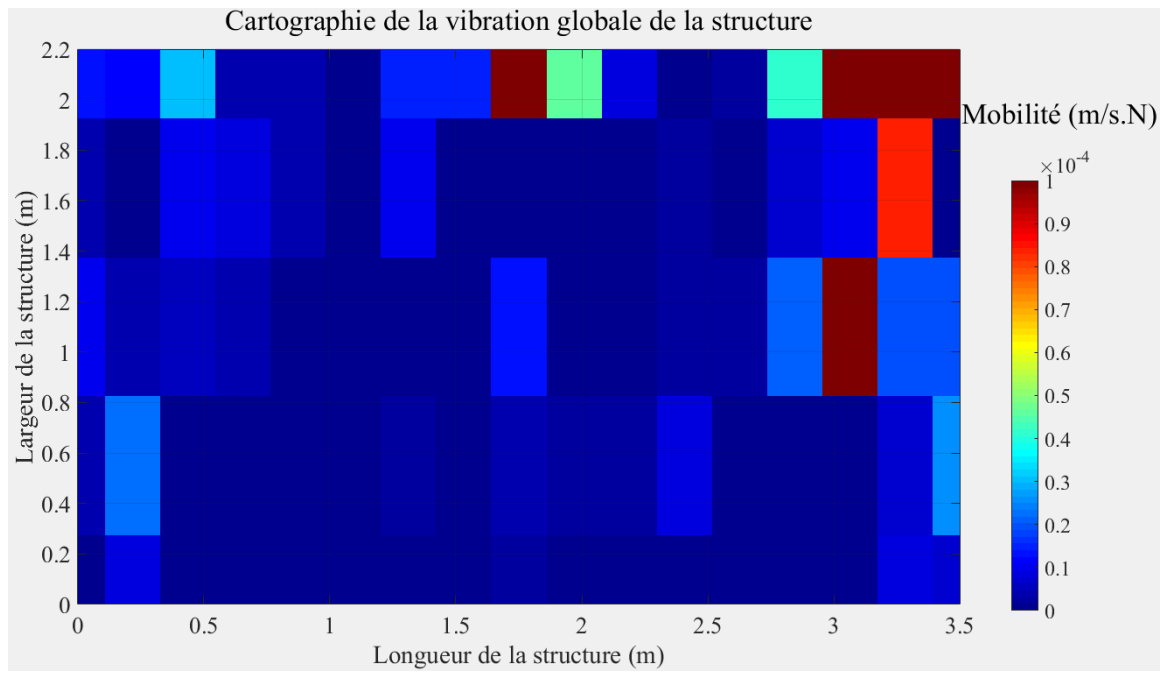
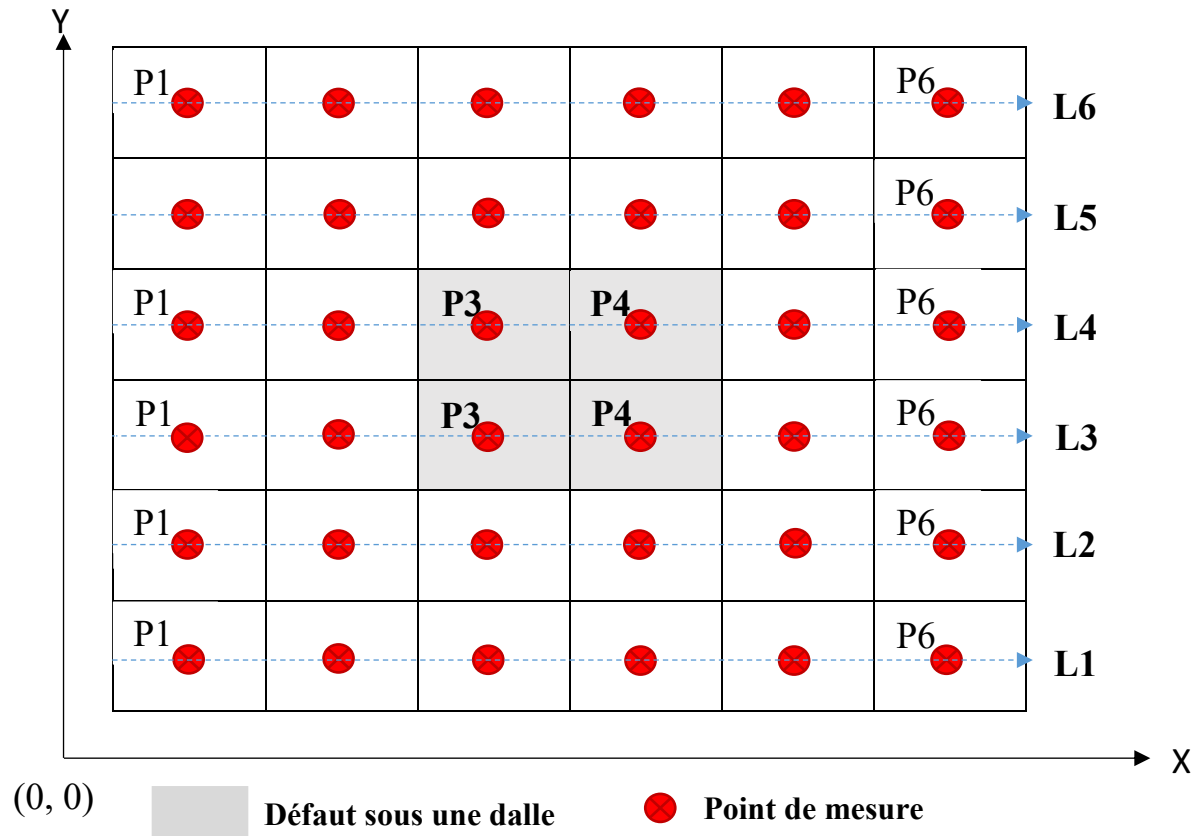


Figure C. 5 : Cartographies des mobilités : Détection des défauts – Mur N° 4

## ANNEXE D

### ÉTAPES DE L'APPROCHE D'ANALYSE DÉVELOPPÉE

#### D.1. RELÈVÉS DES DONNÉES DE LA RÉPONSE IMPULSIONNELLE



Considérons une dalle affectée par un défaut. Les mesures de la RI sont effectuées selon un maillage défini suivant les directions X et Y.

#### D.2. TRAITEMENT DES DONNÉES PAR MATLAB – ÉTAPES DE TRAITEMENT

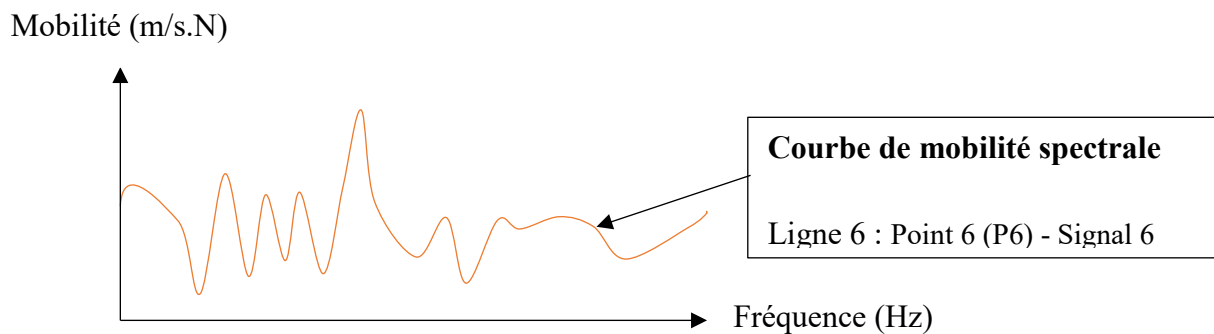
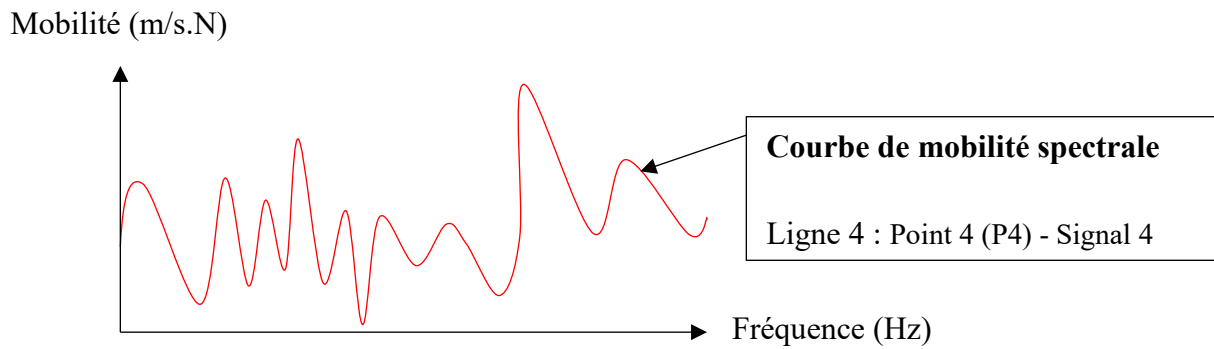
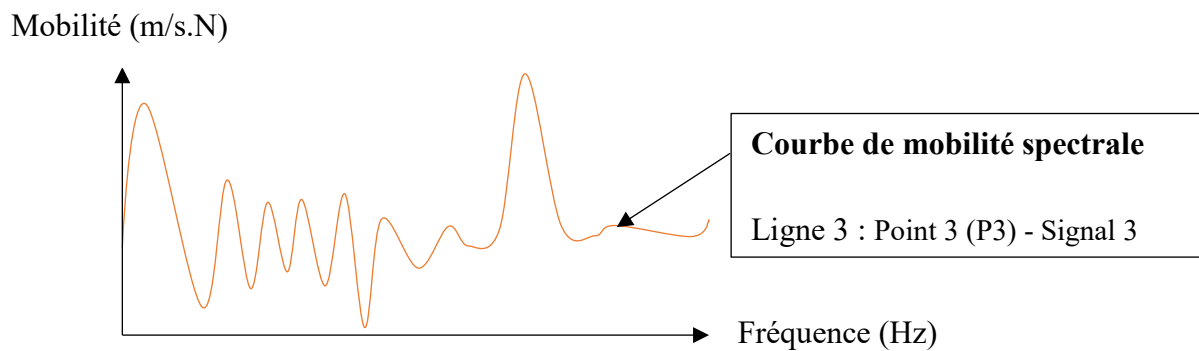
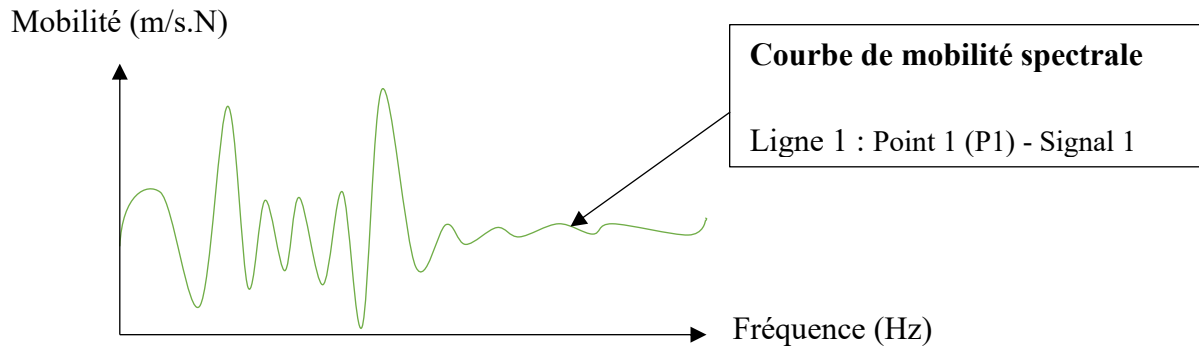
##### 1- Lecture des données et affichage des signaux (courbes de mobilités spectrales)

➤ Lecture des signaux : ligne de mesure par ligne de mesure

- Ligne (L1) : Point 1 (P1) - Signal 1 (S1), Point 2 (P2) - Signal 2 (S2) ...
- Ligne (L2) : Point 1 (P1) - Signal 1 (S1), Point 2 (P2) - Signal 2 (S2) ...
- Ligne (L3) : Point 1 (P1) - Signal 1 (S1), Point 2 (P2) - Signal 2 (S2) ...
- Ligne (L4) : Point 1 (P1) - Signal 1 (S1), Point 2 (P2) - Signal 2 (S2) ...
- Ligne (L5) : Point 1 (P1) - Signal 1 (S1), Point 2 (P2) - Signal 2 (S2) ...
- Ligne (L6) : Point 1 (P2) - Signal 1 (S1), Point 2 (P2) - Signal 2 (S2) ...



➤ Exemples des signaux : Courbes de mobilités spectrales

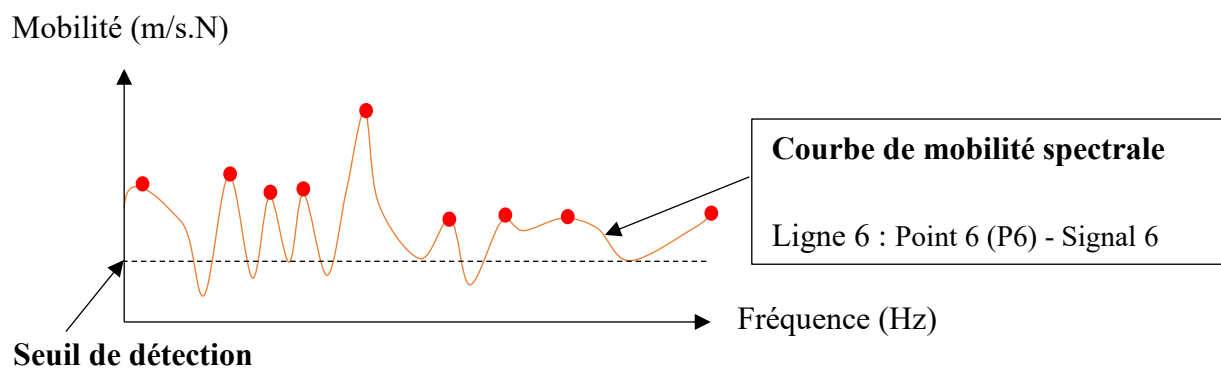
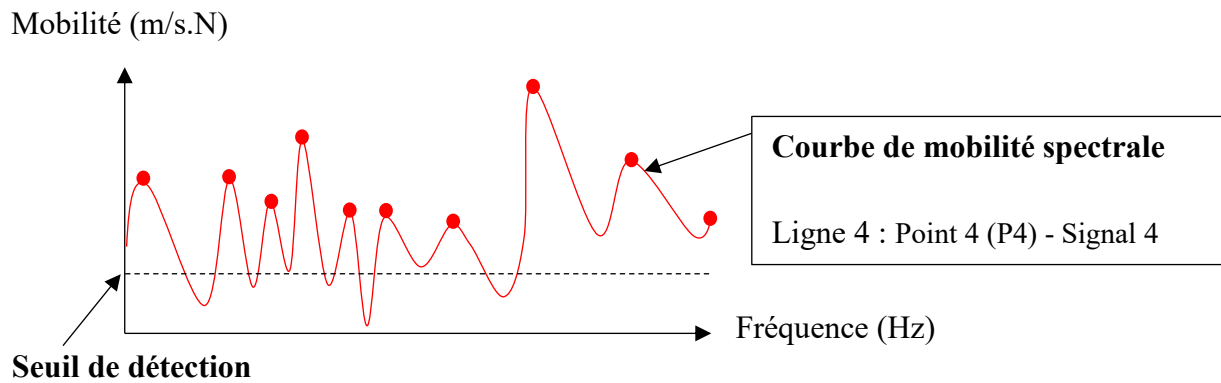
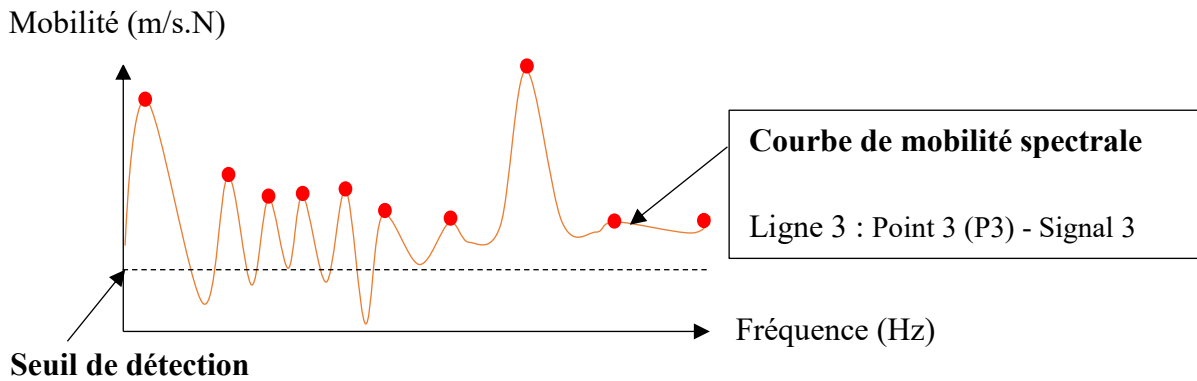
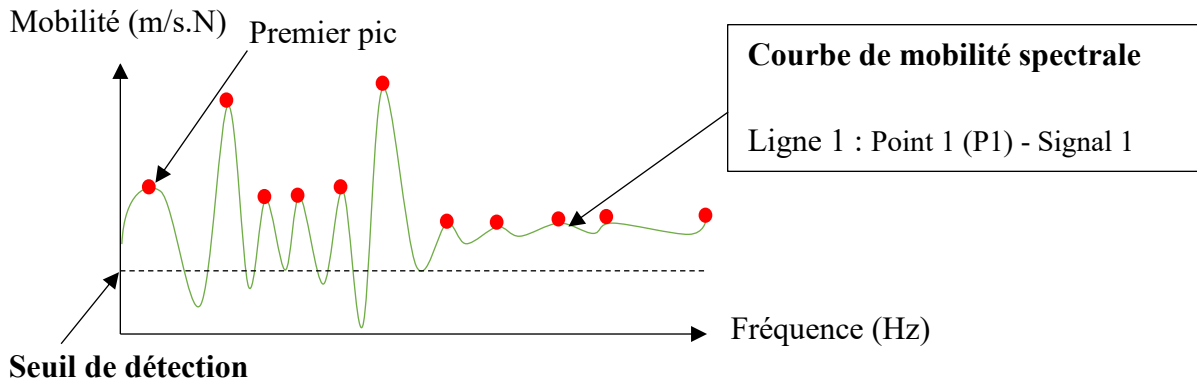


## 2- Détection des pics de mobilités – Définition du seuil de détection des pics

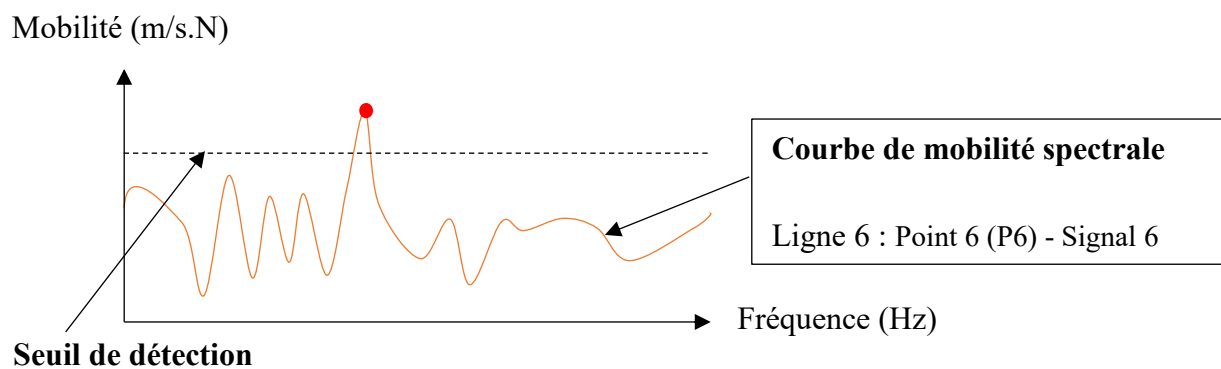
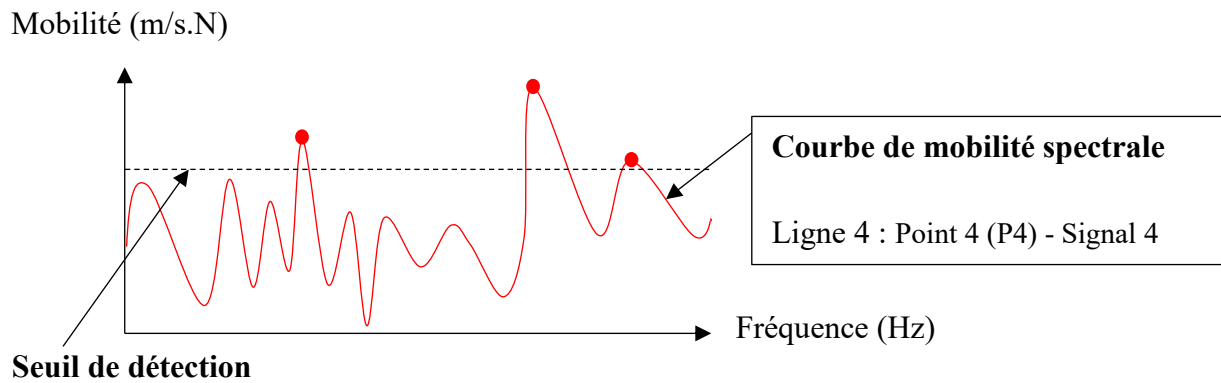
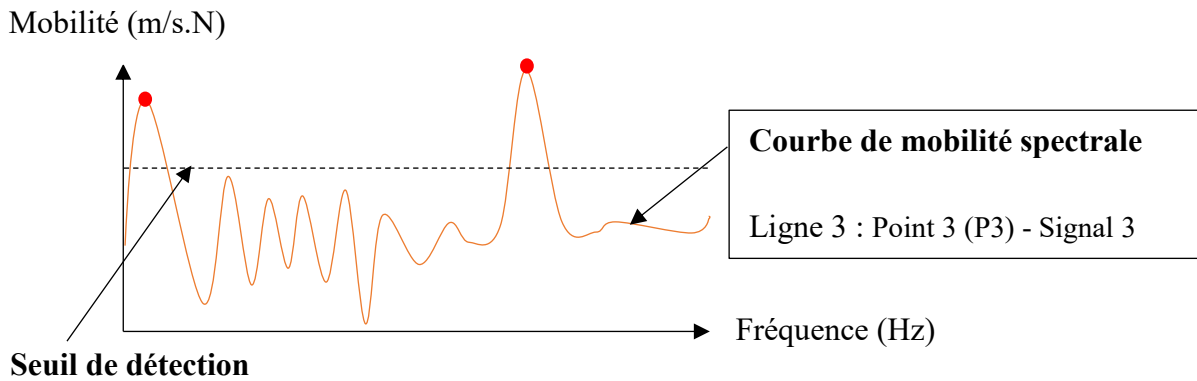
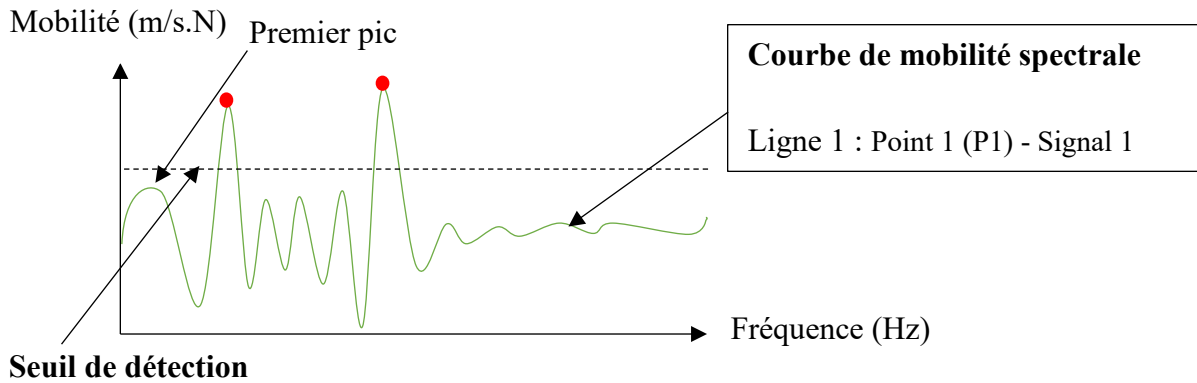
### ➤ Définition du seuil de détection des pics

Le seuil de détection est un seuil absolu défini en fixant une certaine valeur de la mobilité. Il doit être à priori fixé à une valeur qui correspond à epsilon ( $\epsilon$ ) c'est-à-dire une valeur infinitésimale proche de zéro. Le fait d'avoir une valeur égale epsilon permet de détecter et de prendre en considération tous les pics de mobilité sur une courbe de mobilité spectrale y compris donc les pics de très faible amplitude (**Schématisation ci-dessous du cas 1**). Un seuil de détection trop élevé peut faire l'impasse sur la détection des pics de mobilité notamment les pics de faible amplitude associés à la vibration du défaut correspondant généralement aux points d'impact situés à l'extérieur de la zone maximale (centre du défaut) de la mobilité du défaut (**Schématisation ci-dessous du cas 2**). Le fait d'avoir un seuil aussi faible permet donc d'augmenter la résolution du défaut en termes de détection.

- **Cas 1 : Définition du paramètre de seuil de détection des pics – Seuil de détection faible ou égal à epsilon**



➤ **Cas 2 : Définition du paramètre de seuil de détection des pics – Seuil de détection élevé**



### 3- Regroupement des fréquences propres – Définition du facteur de résolution : Pas fréquentiel

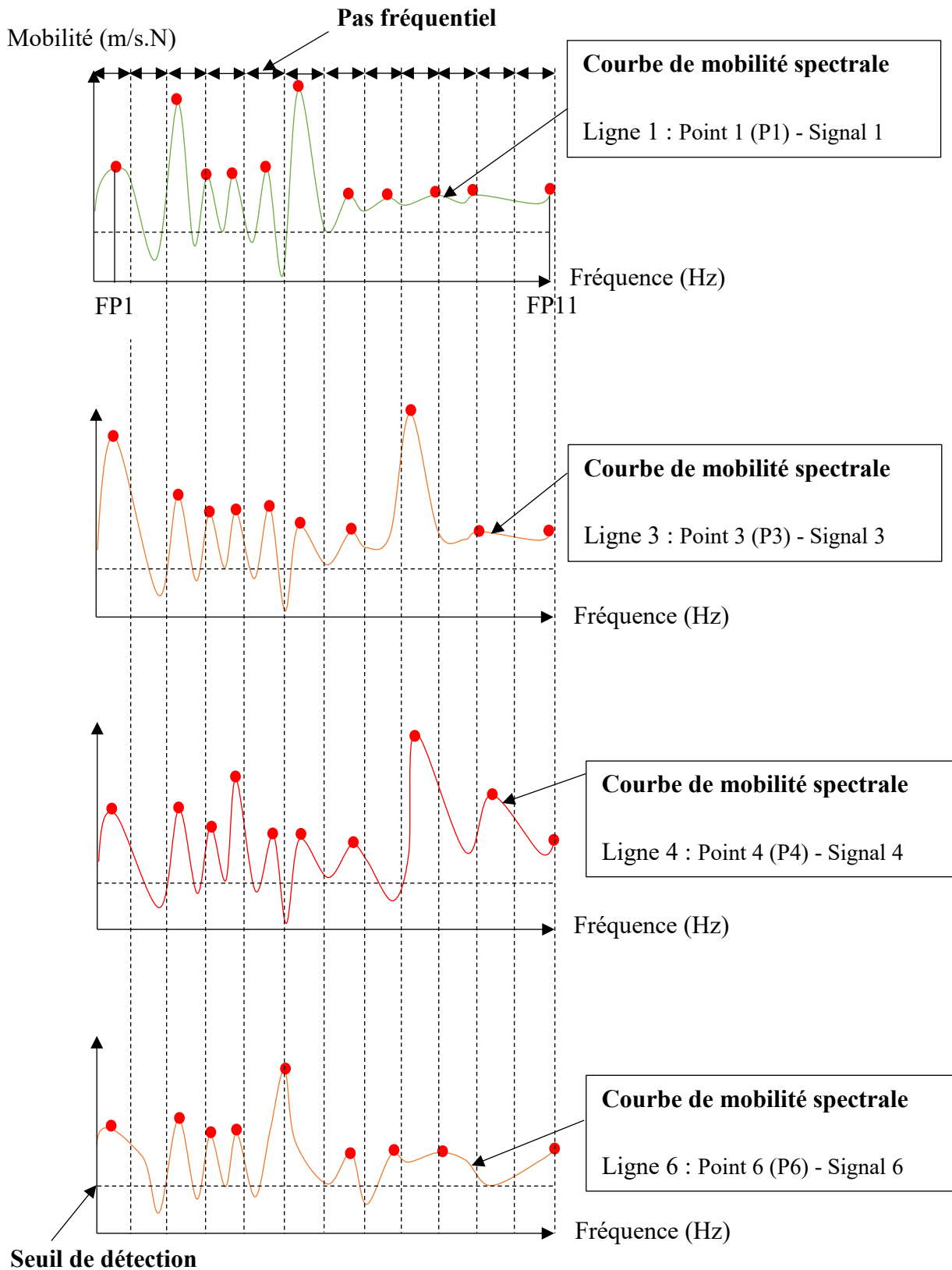
Définition du paramètre dit « **facteur de résolution** ». Ce facteur dépend du pas fréquentiel ou pas d'échantillonnage du signal. La définition du paramètre de résolution consiste à ré-échantillonner le signal sur l'axe des fréquences afin d'identifier toutes les fréquences de vibration correspondant aux différents modes de vibration sur les courbes de mobilité spectrale.

Le pas fréquentiel est défini comme le rapport entre l'étendue fréquentielle signal et le nombre d'échantillons de signal, tel que (**équation 6.3**) :

$$Pas\ fréquentiel\ (Hz) = \frac{étendue\ fréquentielle\ du\ signal\ (Hz)}{Nombre\ d'échantillons\ du\ signal} \quad (12.1)$$

Un pas fréquentiel faible augmente le facteur de résolution. Tous les modes de vibrations sont listés (**Schématisation ci-dessous du cas 1**). Par contre un pas fréquentiel élevé a pour conséquence de supprimer les fréquences propres lors de l'interpolation diminuant ainsi le facteur de résolution (**Schématisation ci-dessous du cas 2**). **L'étape d'interpolation** a pour **but** de prendre en compte **qu'un seul mode propre dans un pas fréquentiel défini**. Le mode conservé est **le mode de forte mobilité**. Les autres modes sont supprimés

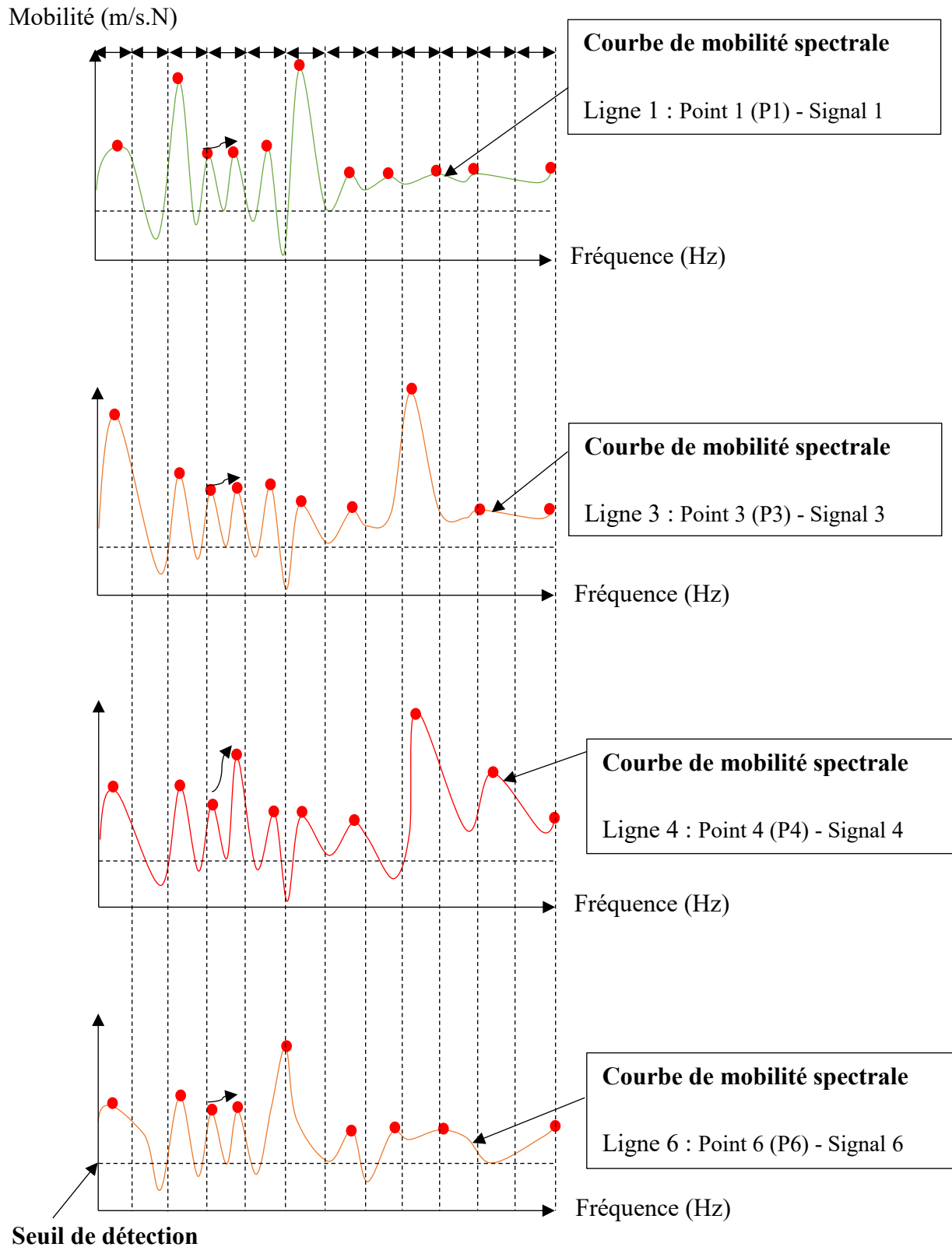
➤ **Cas 1 – a** : Définition du facteur de résolution : Pas fréquentiel faible



- **Cas 1 – b** : Listing de toutes les fréquences propres (FP) point de mesure par point de mesure

Fréquences propres	FP (Hz)	FP (Hz)	FP (Hz)	FP (Hz)	FP (Hz)	FP (Hz)	PF (Hz)	FP (Hz)	FP (Hz)	FP (Hz)	FP (Hz)
<b>Ligne 1: Point 1 (P1) - Signal 1 (S1)</b>	FP1	FP2	FP3	FP4	FP5	FP6	FP7	FP8	FP9	FP10	FP11
<b>Ligne 3: Point 3 (P3) - Signal 3 (S3)</b>	FP1	FP2	FP3	FP4	FP5	FP6	FP7	FP8	FP9	FP10	
<b>Ligne 4: Point 4 (P4) - Signal 4 (S4)</b>	FP1	FP2	FP3	FP4	FP5	FP6	FP7	FP8	FP9	FP10	
<b>Ligne 6: Point 6 (P6) - Signal 6 (S6)</b>	FP1	FP2	FP3	FP4	FP5	FP6	FP7	FP8	FP9		

➤ **Cas 1- c : Interpolation des modes proches**





**Tableau des fréquences propres (FP) issues de l'interpolation**

Fréquences propres	FP (Hz)	FP (Hz)	FP (Hz)	FP (Hz)	FP (Hz)	FP (Hz)	PF (Hz)	FP (Hz)	FP (Hz)	FP (Hz)	FP (Hz)
<b>Ligne 1: Point 1 (P1) - Signal 1 (S1)</b>	FP1	FP2	X	FP4	FP5	FP6	FP7	FP8	FP9	FP10	FP11
<b>Ligne 3: Point 3 (P3) - Signal 3 (S3)</b>	FP1	FP2	X	FP4	FP5	FP6	FP7	FP8	FP9	FP10	
<b>Ligne 4: Point 4 (P4) - Signal 4 (S4)</b>	FP1	FP2	X	FP4	FP5	FP6	FP7	FP8	FP9	FP10	
<b>Ligne 6: Point 6 (P6) - Signal 6 (S6)</b>	FP1	FP2	X	FP4	FP5	FP6	FP7	FP8	FP9		

**X** = Fréquences propres supprimées après l'interpolation

- **Cas 1- d** : Listing de toutes les fréquences propres (FP) point de mesure par point de mesure après interpolation

Fréquences propres	FP (Hz)	FP (Hz)	FP (Hz)	FP (Hz)	FP (Hz)	PF (Hz)	FP (Hz)	FP (Hz)	FP (Hz)	FP (Hz)
<b>Ligne 1: Point 1 (P1) - Signal 1 (S1)</b>	FP1	FP2	FP4	FP5	FP6	FP7	FP8	FP9	FP10	FP11
<b>Ligne 3: Point 3 (P3) - Signal 3 (S3)</b>	FP1	FP2	FP4	FP5	FP6	FP7	FP8	FP9	FP10	
<b>Ligne 4: Point 4 (P4) - Signal 4 (S4)</b>	FP1	FP2	FP4	FP5	FP6	FP7	FP8	FP9	FP10	
<b>Ligne 6: Point 6 (P6) - Signal 6 (S6)</b>	FP1	FP2	FP4	FP5	FP6	FP7	FP8	FP9		

➤ **Cas 1- e : Regroupement ou assemblage des fréquences semblables**

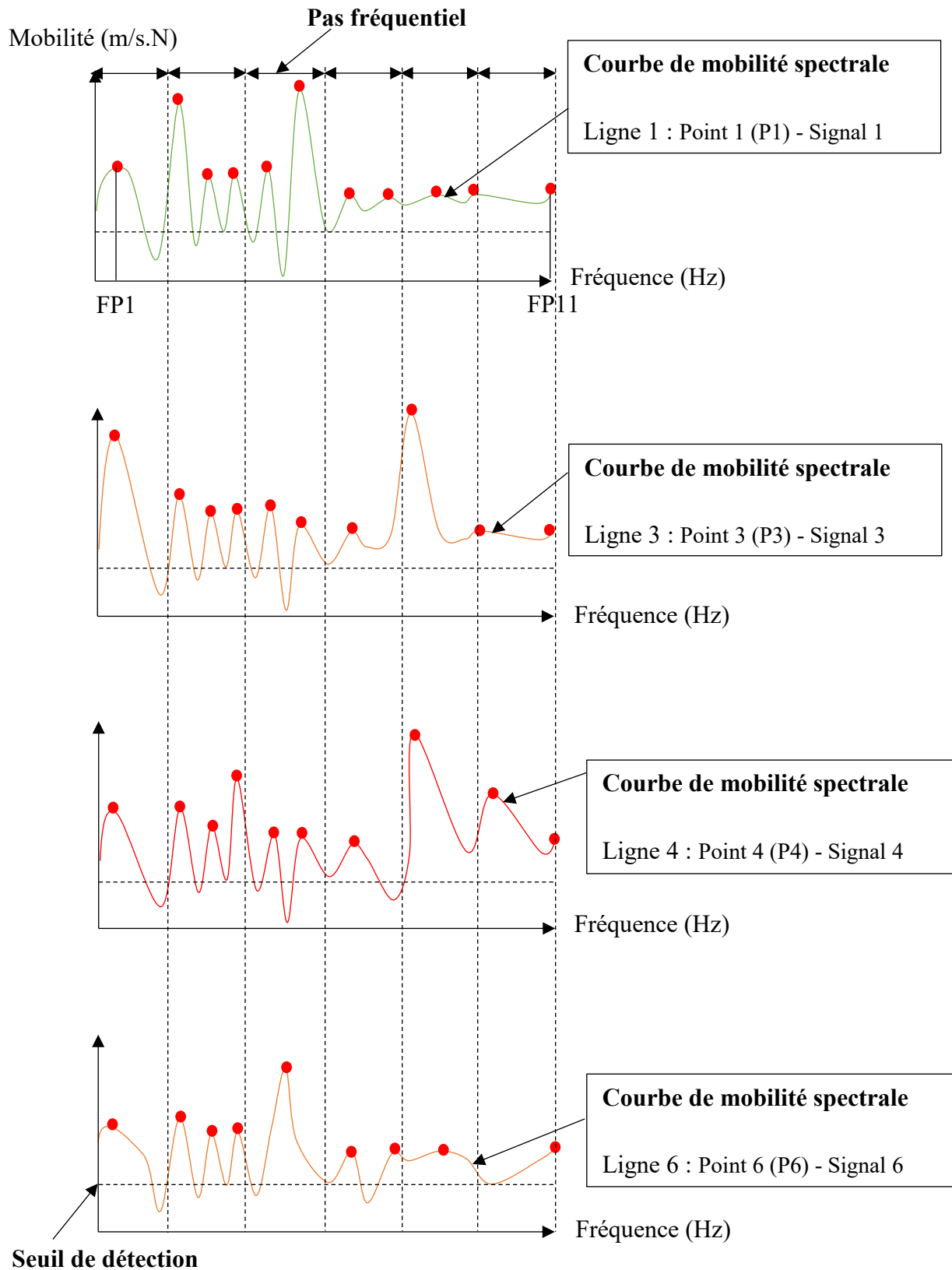
Fréquences propres	FP (Hz)	FP (Hz)	FP (Hz)	FP (Hz)	FP (Hz)	PF (Hz)	FP (Hz)	FP (Hz)	FP (Hz)	FP (Hz)
<b>Ligne 1: Point 1 (P1) - Signal 1 (S1)</b>	FP1	FP2	FP4	FP5	FP6	FP7	FP8	FP9	FP10	FP11
<b>Ligne 3: Point 3 (P3) - Signal 3 (S3)</b>	FP1	FP2	FP4	FP5	FP6	FP7	FP8	FP9	FP10	
<b>Ligne 4: Point 4 (P4) - Signal 4 (S4)</b>	FP1	FP2	FP4	FP5	FP6	FP7	FP8	FP9	FP10	
<b>Ligne 6: Point 6 (P6) - Signal 6 (S6)</b>	FP1	FP2	FP4	FP5	FP6	FP7	FP8	FP9		

Après regroupement des fréquences semblables, on obtient dix (10) fréquences propres (FP1, FP2, FP4, FP5, FP6, FP7, FP8, FP9, FP10, FP11). Ces fréquences forment chacune un mode propre de vibration local ou global. On aura au total dix (10) modes de vibration.

**Remarque :**

Les fréquences propres regroupées sont des fréquences ayant la même valeur fréquentielle d'un point de mesure à l'autre.

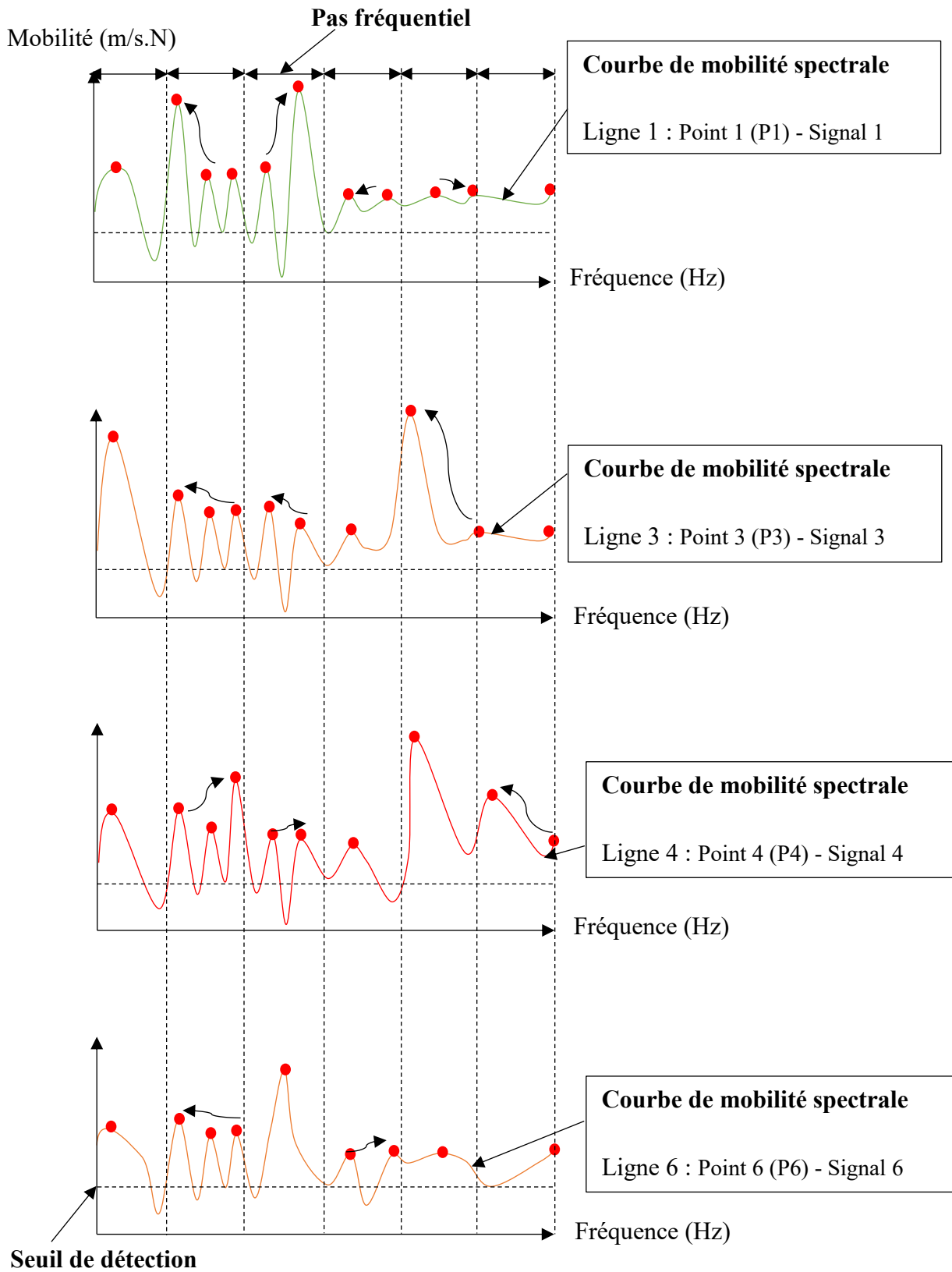
➤ **Cas 2 - a : Définition du facteur de résolution : Pas fréquentiel élevé**



- **Cas 2 - b** : Listing de toutes les fréquences propres (FP) point de mesure par point de mesure

<b>Fréquences propres</b>	<b>FP (Hz)</b>	<b>FP (Hz)</b>	<b>FP (Hz)</b>	<b>FP (Hz)</b>	<b>FP (Hz)</b>	<b>FP (Hz)</b>	<b>PF (Hz)</b>	<b>FP (Hz)</b>	<b>FP (Hz)</b>	<b>FP (Hz)</b>	<b>FP (Hz)</b>
<b>Ligne 1: Point 1 (P1) - Signal 1 (S1)</b>	FP1	FP2	FP3	FP4	FP5	FP6	FP7	FP8	FP9	FP10	FP11
<b>Ligne 3: Point 3 (P3) - Signal 3 (S3)</b>	FP1	FP2	FP3	FP4	FP5	FP6	FP7	FP8	FP9	FP10	
<b>Ligne 4: Point 4 (P4) - Signal 4 (S4)</b>	FP1	FP2	FP3	FP4	FP5	FP6	FP7	FP8	FP9	FP10	
<b>Ligne 6: Point 6 (P6) - Signal 6 (S6)</b>	FP1	FP2	FP3	FP4	FP5	FP6	FP7	FP8	FP9		

➤ **Cas 2 - c : Interpolation des modes proches**



**Tableau des fréquences propres (FP) issues de l'interpolation**

<b>Ligne 1: Point 1 (P1) - Signal 1 (S1)</b>	FP1	FP2	X	X	X	FP6	FP7	X	X	FP10	FP11
<b>Ligne 3: Point 3 (P3) - Signal 3 (S3)</b>	FP1	FP2	X	X	FP5	X	FP7	FP8	X	FP10	
<b>Ligne 4: Point 4 (P4) - Signal 4 (S4)</b>	FP1	X	X	FP4	X	X	FP7	FP8	FP9	X	
<b>Ligne 6: Point 6 (P6) - Signal 6 (S6)</b>	FP1	FP2	X	X	FP5	X	FP7	FP8	FP9		

**X** = Fréquences propres supprimées après l'interpolation

- **Cas 2- d :** Listing de toutes les fréquences propres (FP) point de mesure par point de mesure après interpolation

<b>Ligne 1: Point 1 (P1) - Signal 1 (S1)</b>	FP1	FP2	FP6	FP8	FP10	FP11
<b>Ligne 3: Point 3 (P3) - Signal 3 (S3)</b>	FP1	FP2	FP5	FP7	FP8	FP10
<b>Ligne 4: Point 4 (P4) - Signal 4 (S4)</b>	FP1	FP4	FP7	FP8	FP9	FP10
<b>Ligne 6: Point 6 (P6) - Signal 6 (S6)</b>	FP1	FP2	FP5	FP7	FP8	FP9

➤ **Cas 2 – e** : Regroupement ou assemblage des fréquences propres semblables

<b>Ligne 1: Point 1 (P1) - Signal 1 (S1)</b>	FP1	FP2	FP6	FP8	FP10	FP11
<b>Ligne 3: Point 3 (P3) - Signal 3 (S3)</b>	FP1	FP2	FP5	FP7	FP8	FP10
<b>Ligne 4: Point 4 (P4) - Signal 4 (S4)</b>	FP1	FP4	FP7	FP8	FP9	FP10
<b>Ligne 6: Point 6 (P6) - Signal 6 (S6)</b>	FP1	FP2	FP5	FP7	FP8	FP9

Après regroupement des fréquences semblables, on obtient neuf (9) fréquences propres (FP1, FP2, FP4, FP5, FP6, FP7, FP8, FP9, FP10, FP11). Ces fréquences forment chacune un mode propre de vibration local ou global. On aura au total neuf (9) modes de vibration.

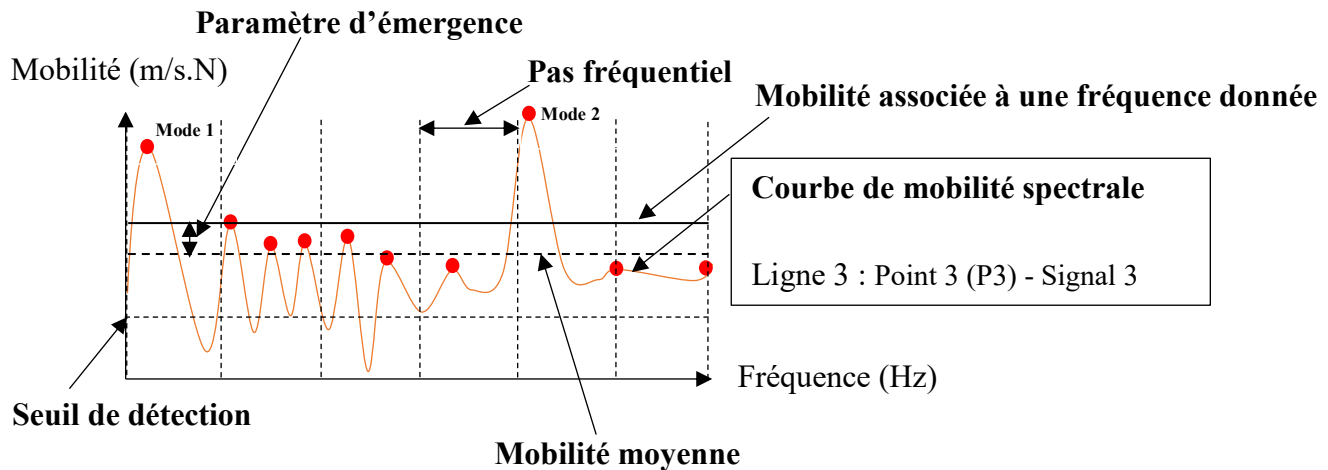
**Remarque :**

Les fréquences propres regroupées sont des fréquences ayant la même valeur fréquentielle d'un point de mesure à l'autre. Par exemple, la fréquence propre FP1 au point 1 de la ligne 1 est égale à la fréquence propre FP1 au point 3 de la ligne 3.

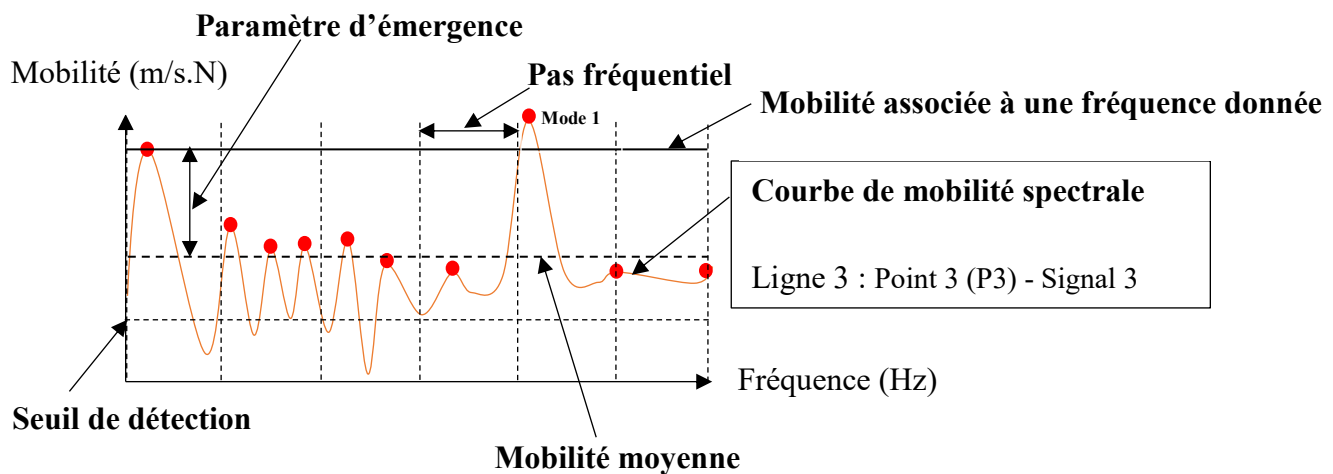
#### 4- Réalisation des cartographies des modes propres – Définition du paramètre d'émergence des modes d'image

➤ **Définition du paramètre d'émergence des modes propres :** Écart entre la mobilité moyenne et la mobilité correspondant à une fréquence propre de vibration donnée.

- **Cas 1 : Définition du paramètre de d'émergence - Paramètre d'émergence faible**



- **Cas 2 : Définition du paramètre de d'émergence - Paramètre d'émergence élevé**



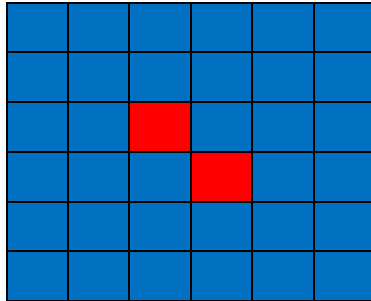
Plus le paramètre d'émergence est faible, plus les modes propres émergent. Le cas 1 (paramètre d'émergence faible), deux modes émergent (mode 1 et mode 2). Le cas 2 (paramètre d'émergence élevé), un mode apparaît (mode 1). Ces modes correspondent aux modes propres de vibration locale et globale.



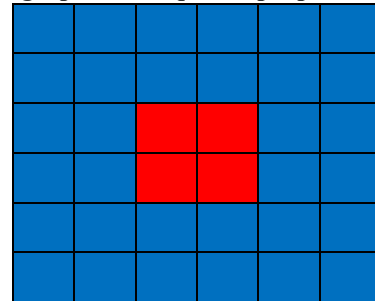
- **Cartographies des modes propres par fréquence propre** : les cartographies sont construites à partir des modes propres qui émergent.

- **Exemples de cartographies des modes propres :**

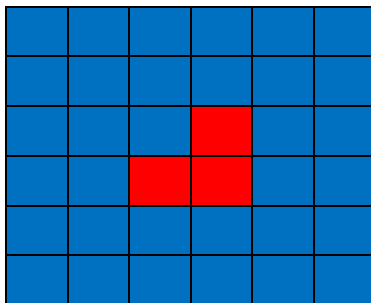
**Cartographie : Fréquence propre = FP7**



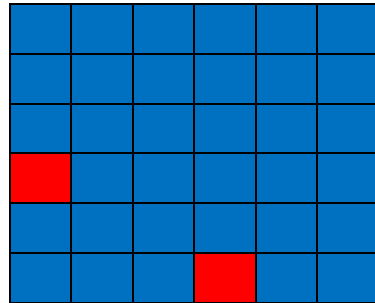
**Cartographie : Fréquence propre = FP8**



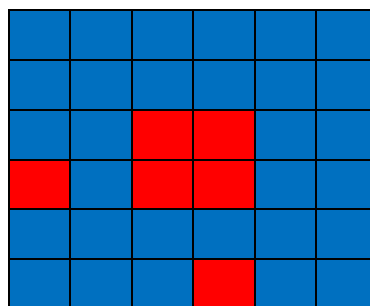
**Cartographie : Fréquence propre = FP9**



**Cartographie : Fréquence propre = FP10**



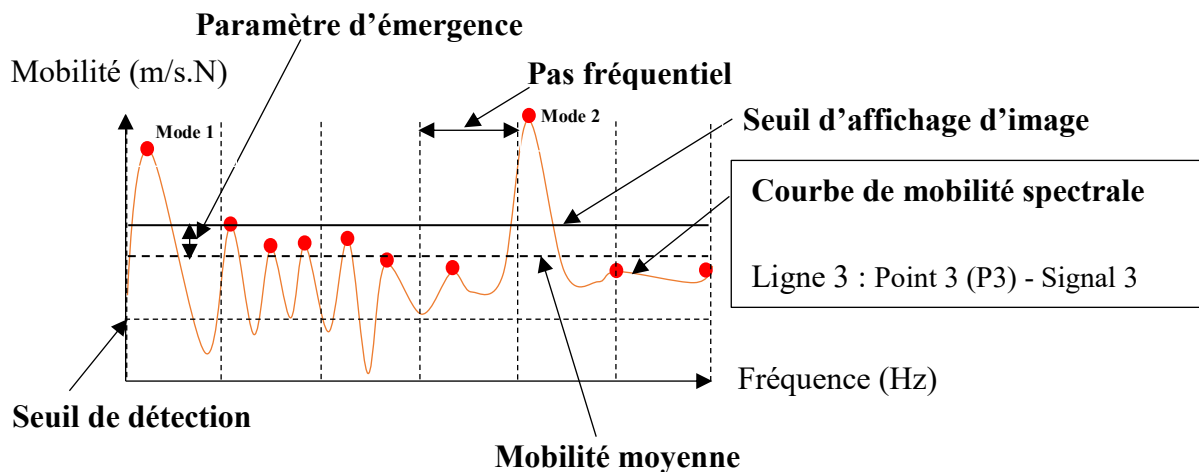
- **Cartographie globale issue de la sommation de toutes des cartographies de chaque mode propre de la structure**



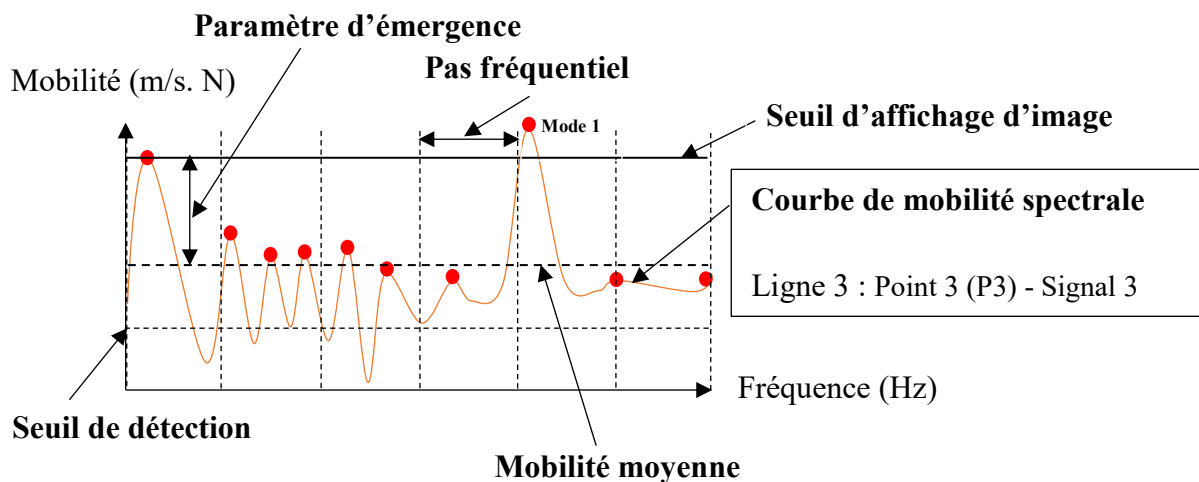
## 5- Estimation des caractéristiques du défaut – Définition du paramètre de seuil d’affichage d’image.

- **Définition du paramètre de seuil d’affichage d’image :** Ce paramètre permet de préciser parmi tous les modes, le ou les modes locaux. Au-dessus du seuil défini, les modes, sont des modes locaux. Puis, on peut déduire le diamètre de ces modes locaux en comptant le nombre de pixels associés à ces modes.

- **Cas 1 : Définition du paramètre de seuil d’affichage d’image - Paramètre de seuil d’affichage d’image faible ou égale à zéro**



- **Cas 2 : Définition du paramètre de seuil d’affichage d’image - Paramètre de seuil d’affichage d’image élevé**



Plus le paramètre de seuil d’affichage est faible ou égal à zéro (mobilité absolue), plus plusieurs modes propres associés à la vibration d’un ou plusieurs défauts seront considérés. Le cas 1 (paramètre de seuil faible), on a deux modes associés la vibration d’un ou plusieurs défauts (mode 1 et mode 2). Par contre, pour le cas 2 (paramètre de seuil élevé), on dispose d’un seul mode propre (mode 1) associé à la vibration d’un défaut. Le mode associé au défaut est validé en observant les courbes de mobilité (le pic de mobilité le plus élevé est généralement associé au défaut). La cartographie de vibration globale donne également des informations sur les zones de fortes mobilités qui correspondraient aux zones des défauts.

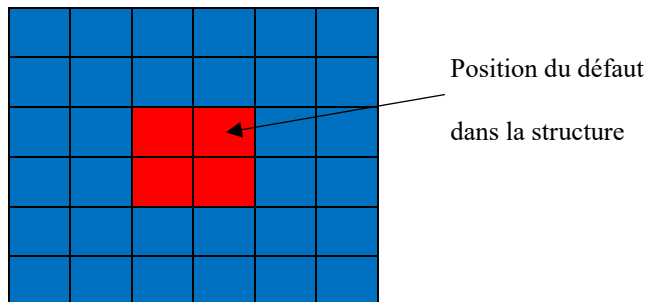
### ➤ L’estimation de la profondeur du défaut

Les cartographies donnent des informations sur l’étendue du défaut et donc sur ses dimensions (largeur, diamètre) en comptant le nombre de pixels de chaque cartographie. Un pixel correspond à une unité métrique. Puis, connaissant la fréquence vibratoire propre du défaut (premier mode), on est en mesure d’estimer la profondeur du défaut en utilisant l’équation de vibration en flexion des plaques minces (équation 6.1).

L’estimation de la profondeur du défaut se fait selon deux approches :

- **Approche 1 :** Estimation du diamètre et de la profondeur du défaut à partir de la cartographie de vibration locale de premier mode du défaut.

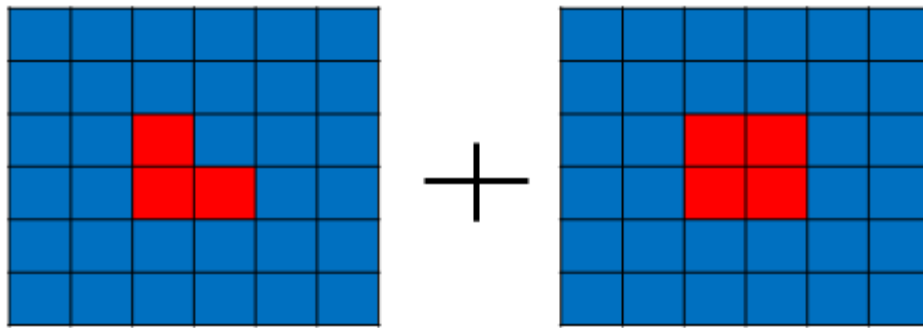
Cartographie : Fréquence propre = FP8



- **Approche 2 :** Estimation du diamètre et de la profondeur du défaut à partir de la cartographie de vibration issue de la sommation des cartographies des modes propres proches du premier mode propre du défaut dont le coefficient de corrélation calculé par rapport à la cartographie de vibration globale est élevé.

**Cartographie : Fréquence propre = FP7**

**Cartographie : Fréquence propre = FP9**



**Cartographie de vibration résultante**

